

Die Expansion des Universums – ein Streitfall über 100 Jahre



Bruno Leibundgut
(ESO)

Die Milchstraße



26 Februar 2020

Bruno Leibundgut

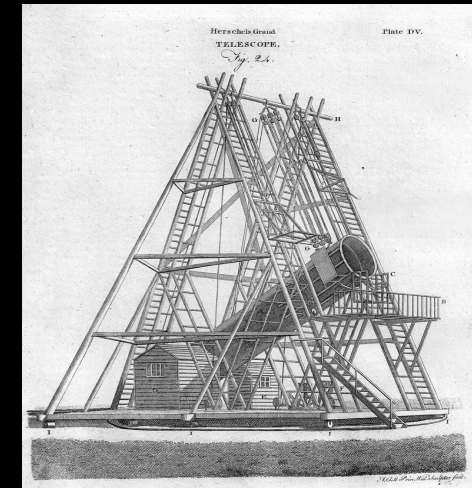
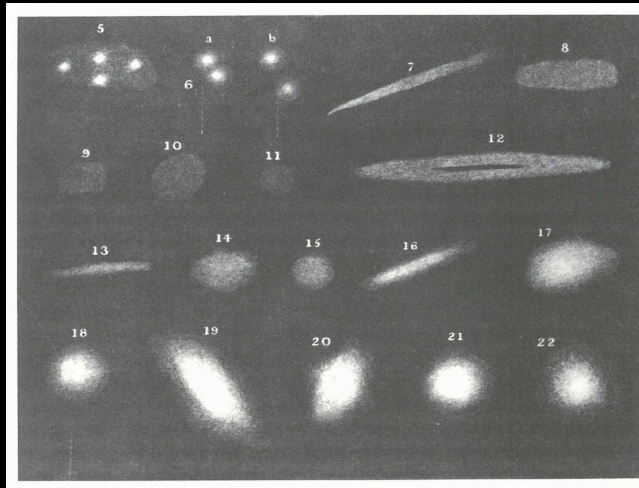
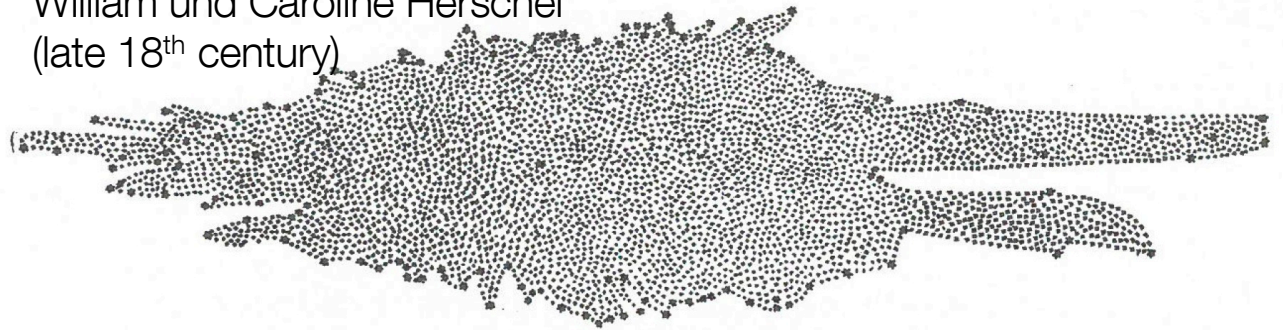
William and Caroline Herschel und die Milchstraße(n)

Colour lithograph by A. Diethel, ca. 1896. Credit: Wellcome Collection.



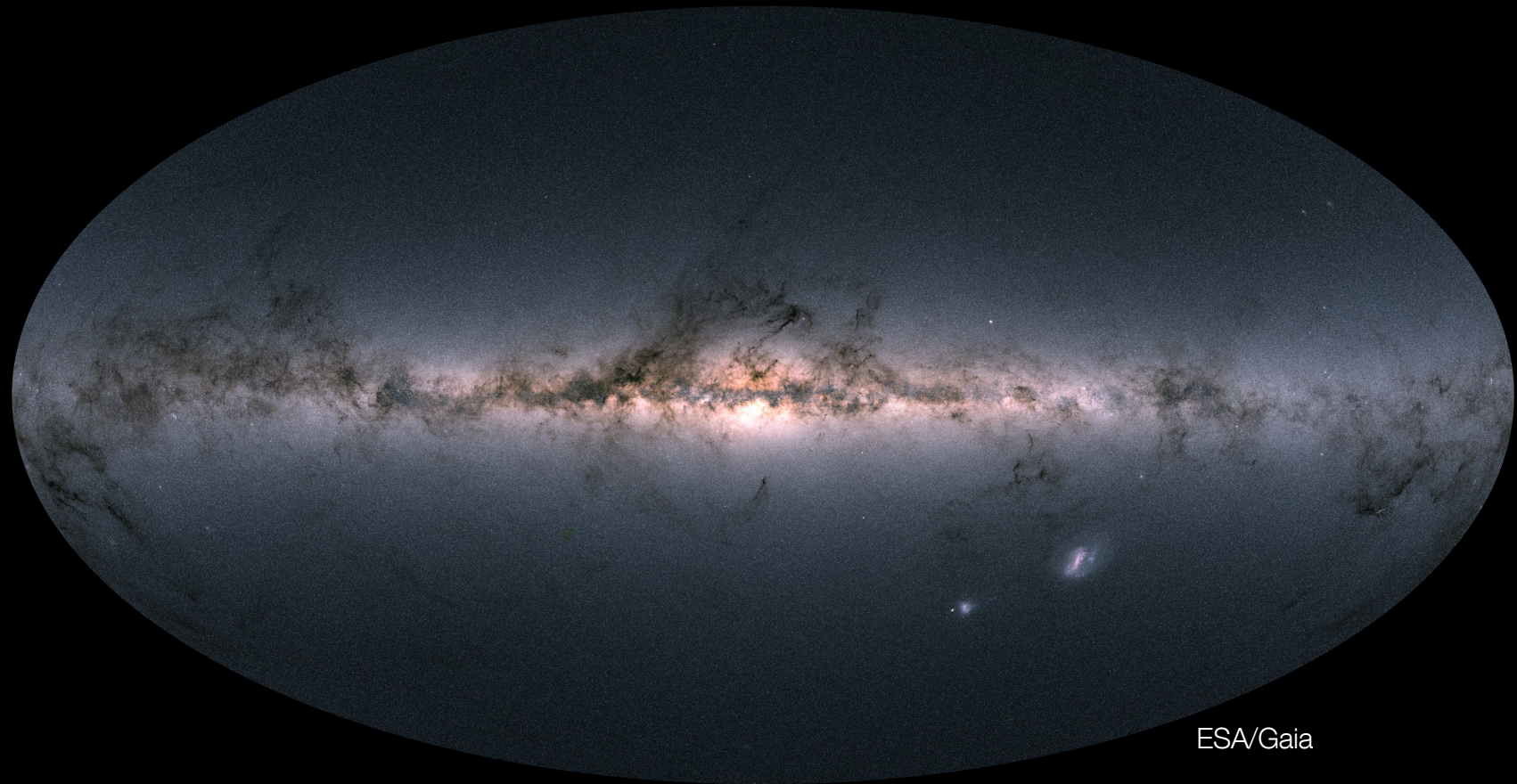
Caroline Herschel.

William und Caroline Herschel
(late 18th century)



Bruno Leibundgut

Die Milchstraße (Gaia)



ESA/Gaia

26 Februar 2020

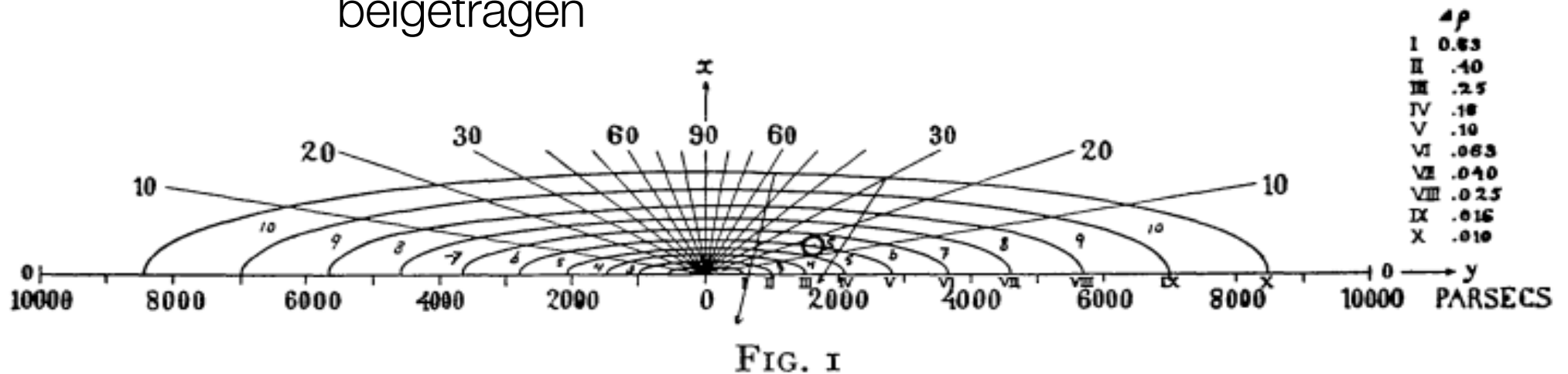
Bruno Leibundgut



Modelle der Milchstraße (1900-1920)

Jacobus Kapteyn (1922)

- basierend auf Sternzählungen in verschiedenen Richtungen
- Kapteyn hat vor allem Sterne am Südhimmel beigetragen





Modelle der Milchstraße (1900-1920)

Harlow Shapley (1918)

- untersuchte die Verteilung der Kugelsternhaufen
- asymmetrische Verteilung am Himmel
- fand eine 10-fach größere Verteilung als Kapteyn

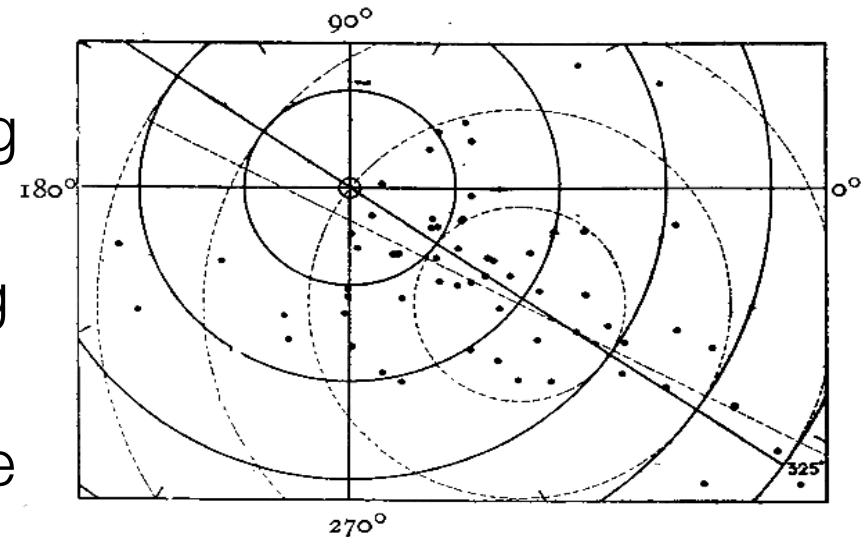
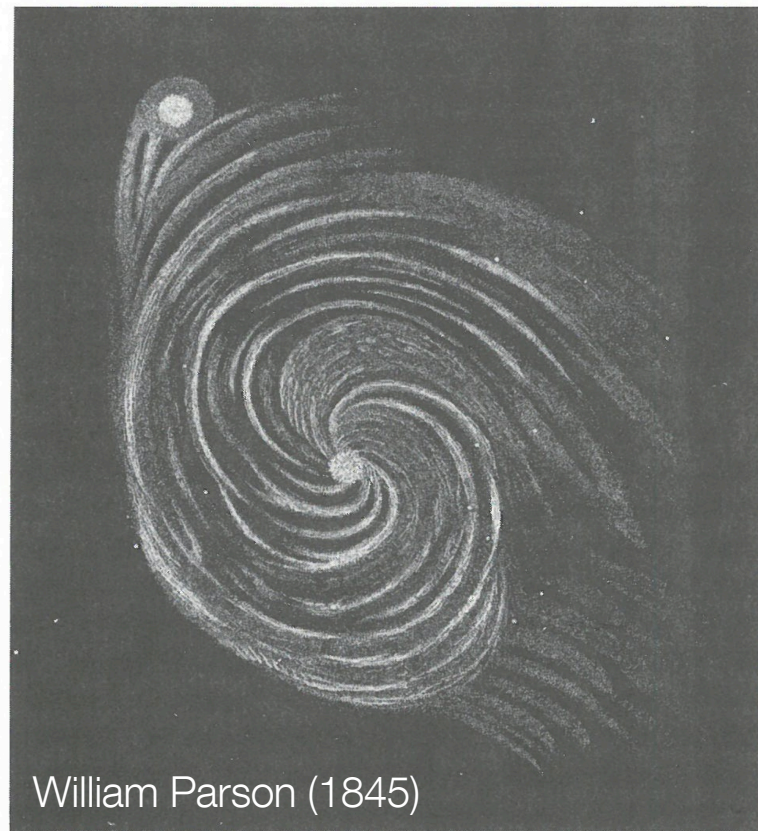
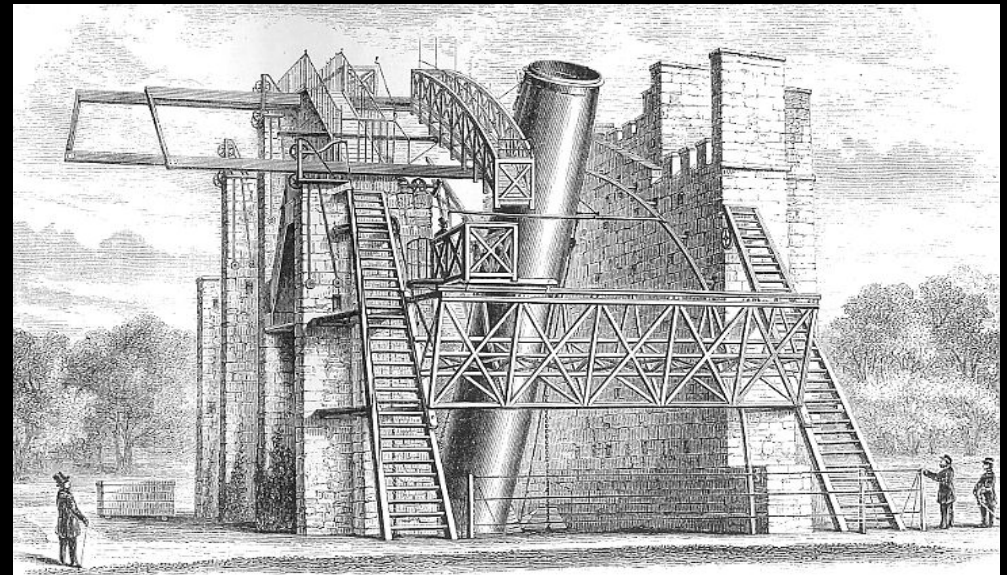


FIG. 5. The system of globular clusters projected on the plane of the galaxy. The galactic longitude is indicated for every thirty degrees. The "local system" is completely within the smallest full-line circle, which has a radius of a thousand parsecs. The larger full-line circles, which are also heliocentric, have radii increasing by intervals of 10,000 parsecs. The broken line indicates the suggested major axis of the system, and the broken circles are concentric about its center. The dots are about four times the actual diameters of the clusters on this scale. Nine clusters more distant from the plane than 15,000 parsecs are not included in the diagram.

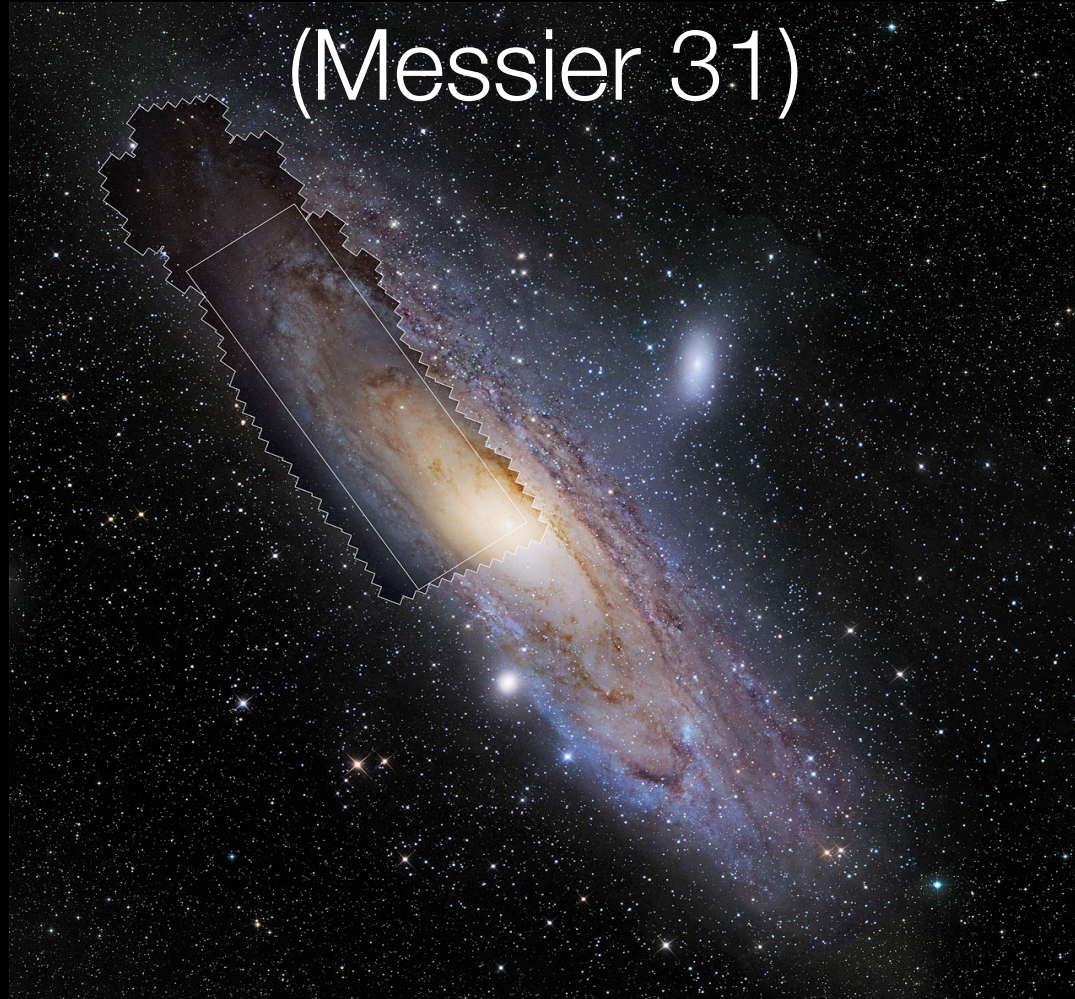
Erste Spiralstrukturen (Lord Ross)



Neues Großteleskop benötigt
(72"; 180cm)
"Leviathan of Parsonstown"



Die Andromeda Galaxy (Messier 31)



STScI

26 Februar 2020

Bruno Leibundgut

Ein Zwilling der Milchstraße



ESO

26 Februar 2020

Bruno Leibundgut

Ein möglicher Zwilling der Milchstraße NGC 891



26 Februar 2020

LBT

Bruno Leibundgut

Die Magellanschen Wolken



ESO

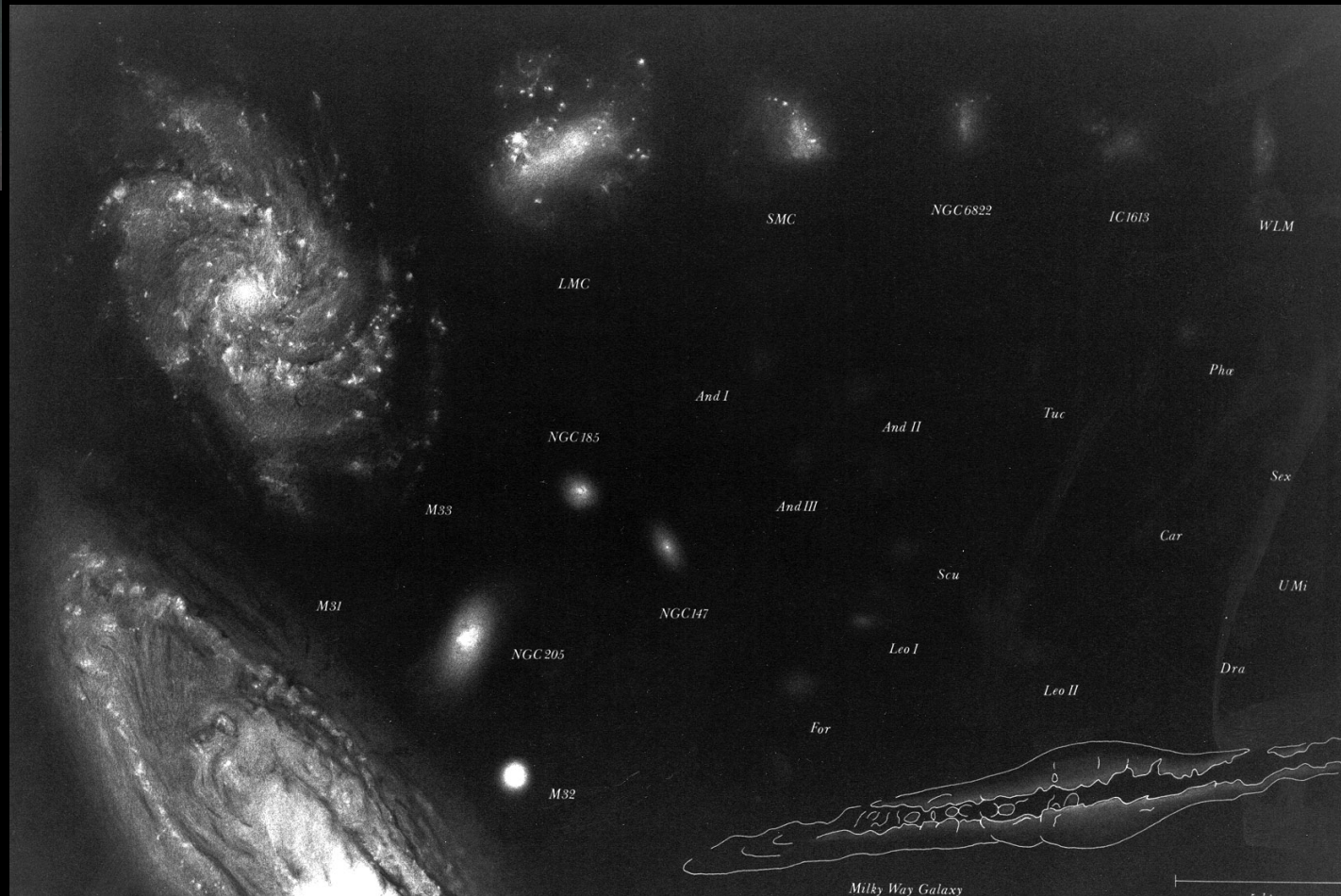
26 Februar 2020

Bruno Leibundgut



Bruno Binggeli

Galaxien der Lokalen Gruppe



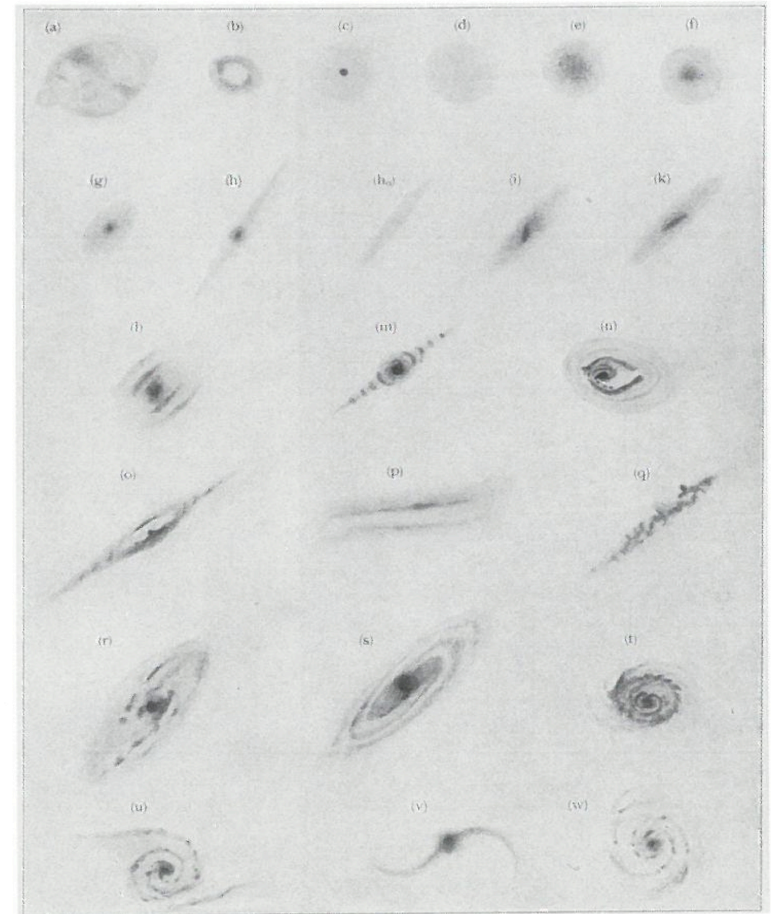
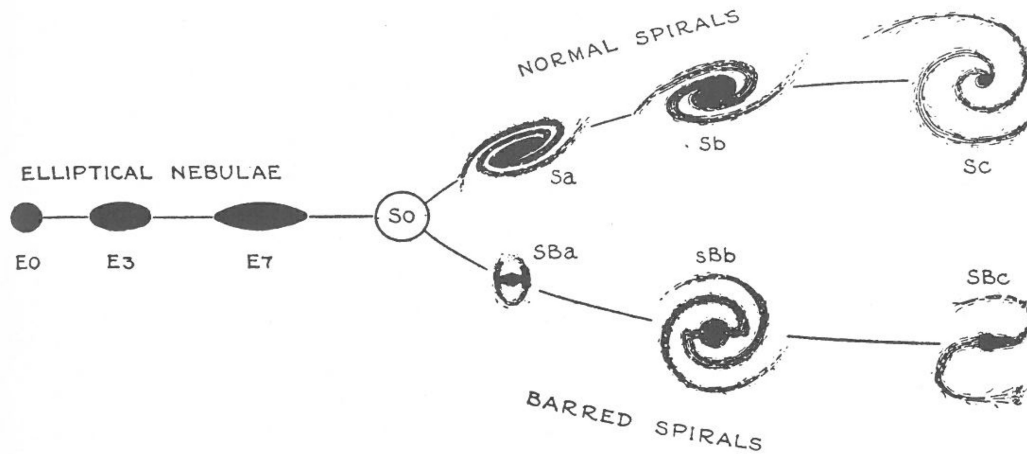
26 Februar 2020

Bruno Leibundgut

Verschiedene Galaxientypen

Hubbles erste Versuche
(in seiner Doktorarbeit)

Hubbles „Stimmgabel“ (1936)



Ein Himmel voller Galaxien

ESO

26 Februar 2020

Bruno Leibundgut

Galaxienhaufen (mit Gravitationslinsen)

STScI

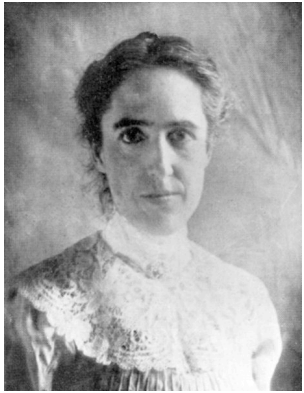
26 Februar 2020

Abell 2218; $z=0.18$ - HST

Bruno Leibundgut



Hubble Space Telescope
Ultradeep Field



Cepheiden Sterne

Henrietta Leavitt entdeckt eine Leuchtkraft-Perioden Relation

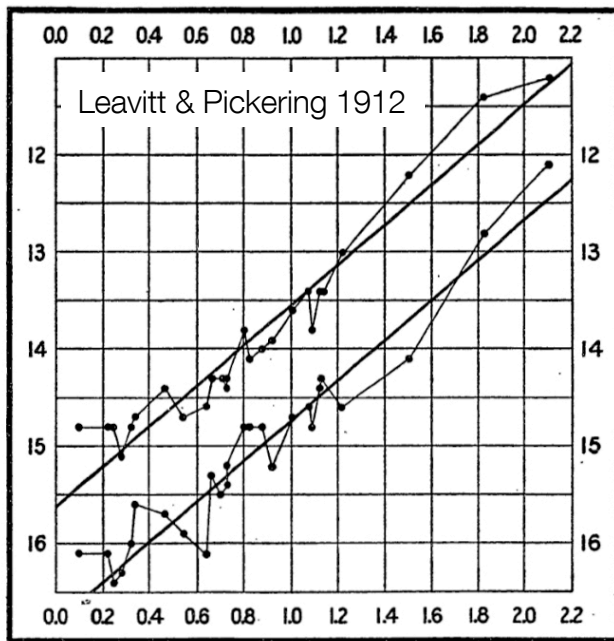
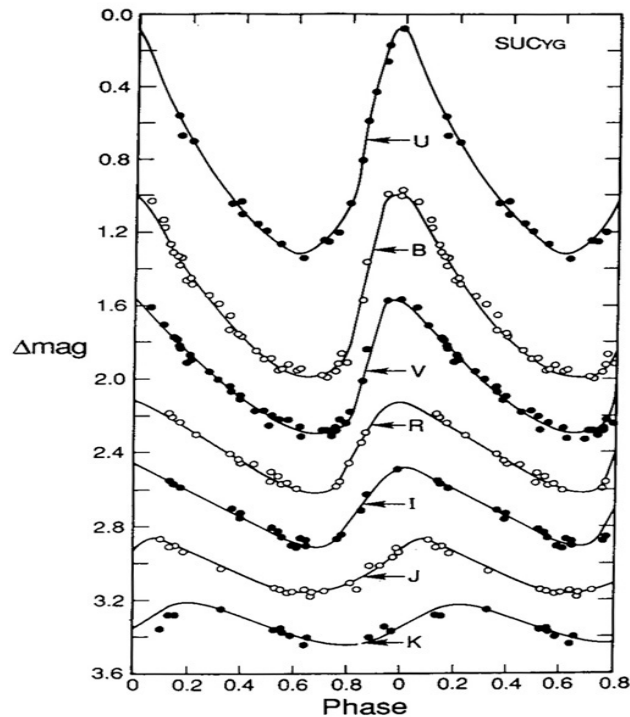


FIG. 2.



Madore & Freedman (1991)



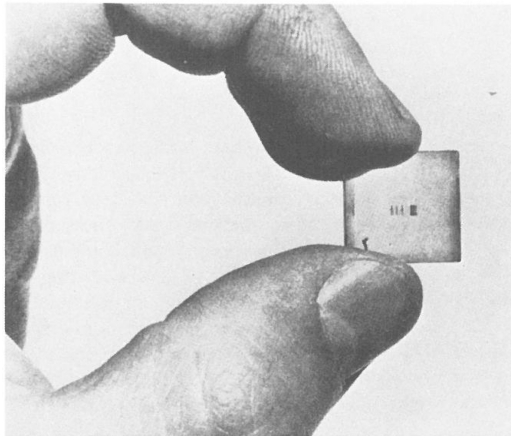
Bruno Leibundgut



Rotverschiebungen

Vesto Slipher beobachtet die Geschwindigkeiten in den Spektren von Nebeln (1912)

- typischerweise mehrere 100 km/s
- erstaunlicherweise beinahe alle mit *Fluchtgeschwindigkeit*, d.h. sie bewegen sich von uns weg (Rotverschiebung)



A typical spectrogram. The plate measures 15 mm x 15 mm. (A. Sandage, "The Red Shift," *Scientific American*, Sept. 1956)

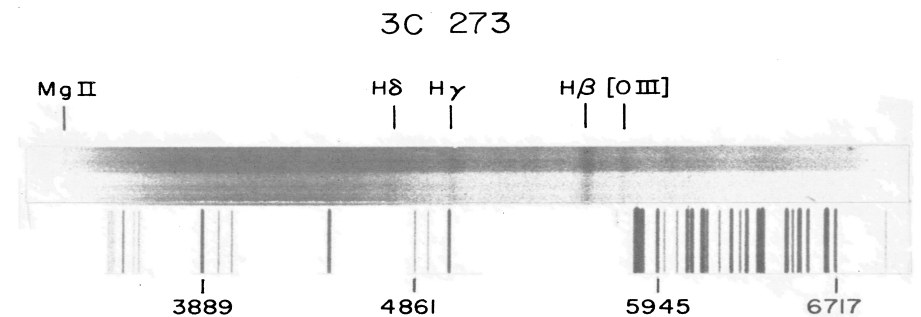


FIG. 2.—Spectrum of the quasi-stellar object 3C 273B, 400 Å/mm original, 103a-F, January 23, 1963. The comparison spectrum is H + He + Ne. Exposure over the upper half of slit was three times that over the lower half. Redshifted emission lines of H and [O III] are indicated; also the barely visible line of Mg II, confirmed on denser exposures.

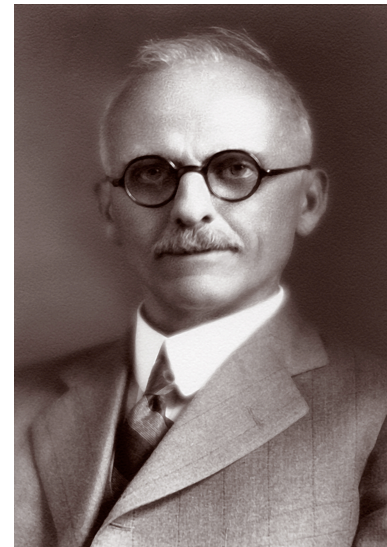
Greenstein & Schmidt 1964

Bruno Leibundgut

Great Debate: Wie groß ist das Universum?

Präsentationen an der Jahrestagung der National Academy of Science in Washington DC, 26. April 1920

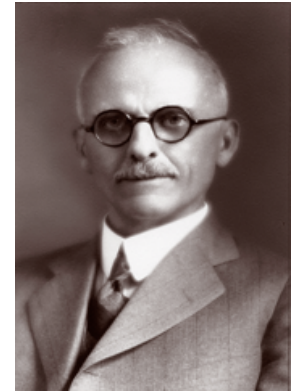
Harlow Shapley vs. Heber Curtis



<http://incubator.rockefeller.edu/geeks-of-the-week-harlow-shapley-heber-curtis/>

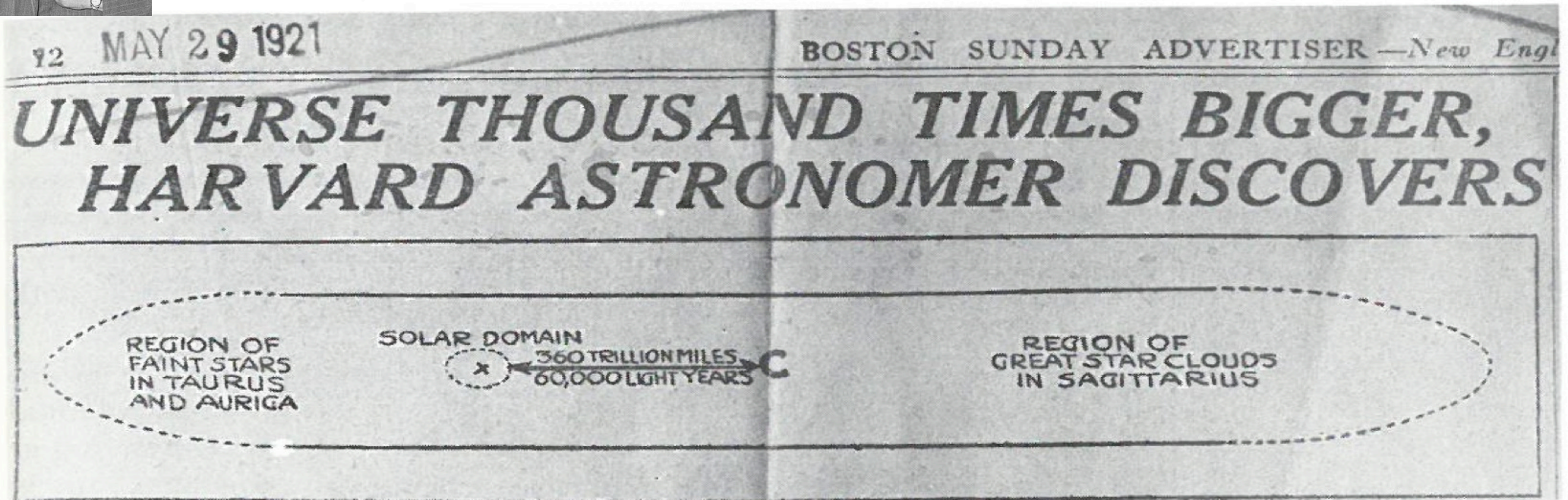


Wie groß ist das Universum?



Harlow Shapley	Heber Curtis
Schlussfolgerungen	
Der Durchmesser der Milchstraße ist circa 100 kpc.	Der Durchmesser der Milchstraße ist circa 10 kpc.
Spiralnebel sind in ihrer Größe nicht vergleichbar mit der Milchstraße und sind relativ nahe.	Spiralnebel sind Galaxien wie die Milchstraße und haben Entfernungen von etwa 150 kpc für Andromeda und bis zu 3000 kpc für die entferntesten bekannten Objekte.

Reaktion der Presse



A newspaper headline announcing Shapley's discovery of the large size of the Milky Way. (*Boston Sunday Advertiser*, 29 May 1921)

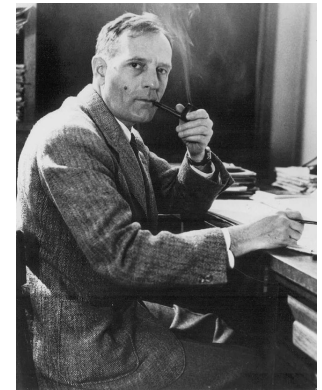
Des Rätsels Lösung

Hohe Radialgeschwindigkeiten der Spiralnebel

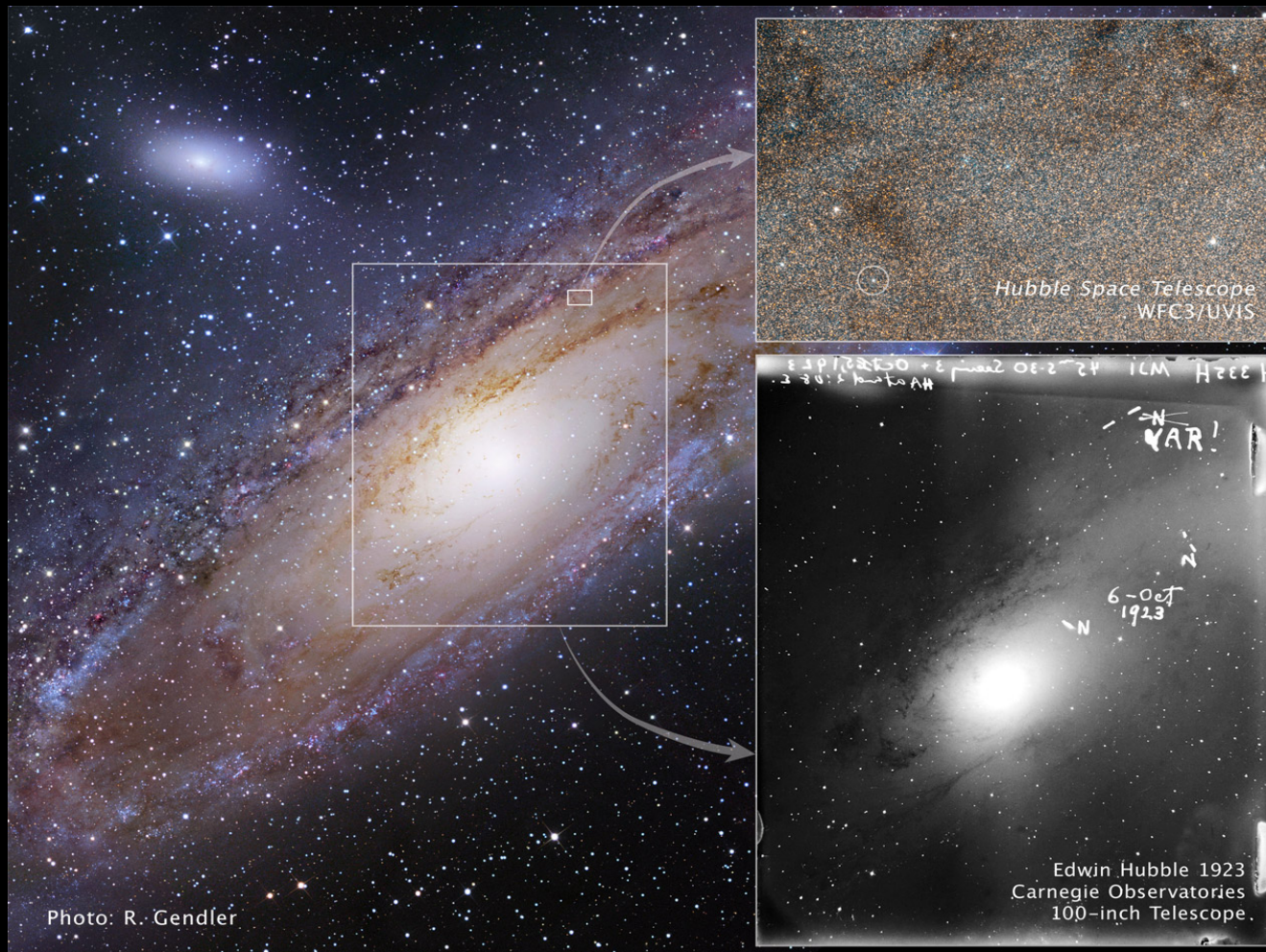
- mehrere 100 km/s
- Sterne in der Milchstraße haben typischerweise weniger als 100 km/s

Genaue Entfernungsmessungen

- Edwin Hubble entdeckt Cepheiden (veränderliche) Sterne in der Andromeda Galaxie (Messier 31)

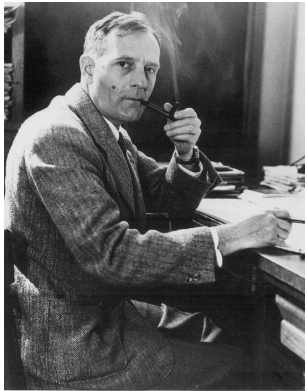


Hubble findet Cepheiden Sterne in Andromeda

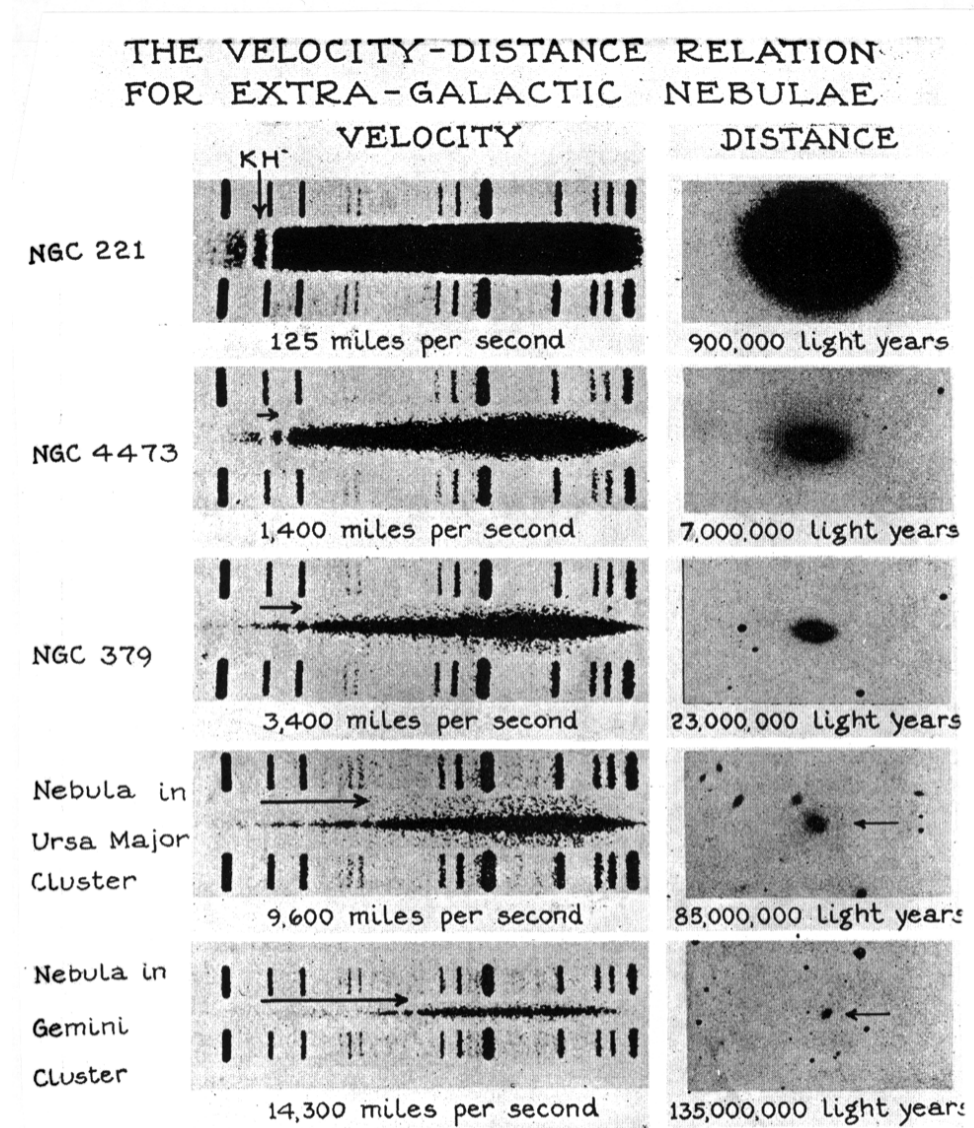


26 Februar 2020

Bruno Leibundgut



Die Expansion des Universums



Hubble/Humason 1936

Bruno Leibundgut



Lundmarks Universum

Erstes Hubble-Lemaître Diagramm (1924)

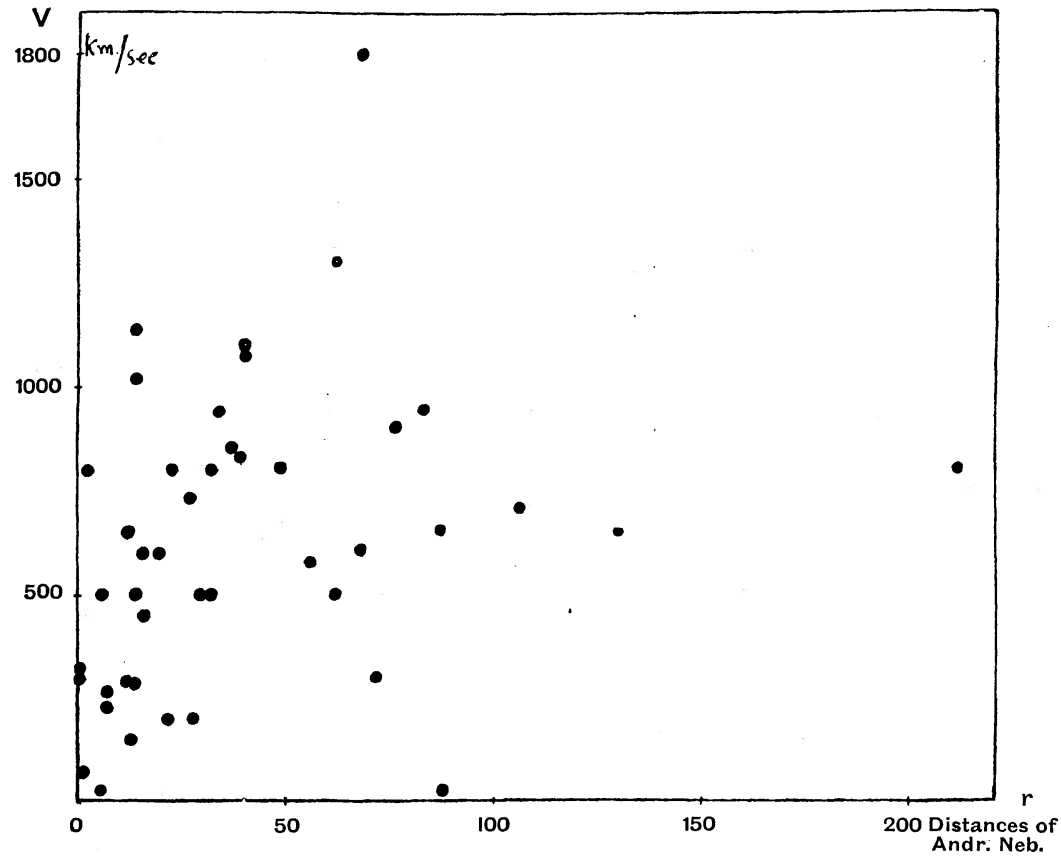


FIG. 5.—Relation between the relative distances (the unit is the distance of the Andromeda nebula) and the measured radial velocities of spiral nebulae.



Die Geschichte der Hubble Konstante H_0

Expansionsrate berechnet von G. Lemaître (1927)

de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

mesure donc l'effet Doppler apparent dû à la variation du rayon de l'univers. *Il est égal à l'excès sur l'unité du rapport des rayons de l'univers à l'instant où la lumière est reçue et à l'instant où elle est émise.* v est la vitesse de l'observateur qui produirait le même effet. Lorsque la source est suffisamment proche nous pouvons écrire approximativement

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r$$

où r est la distance de la source. Nous avons donc

Footnote!

(²) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à $1,46 \times 10^6$ parsecs, 575 Km./sec à 10^6 parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en

Das expandierende Universum

Hubbles Hubble-Lemaître Diagramm

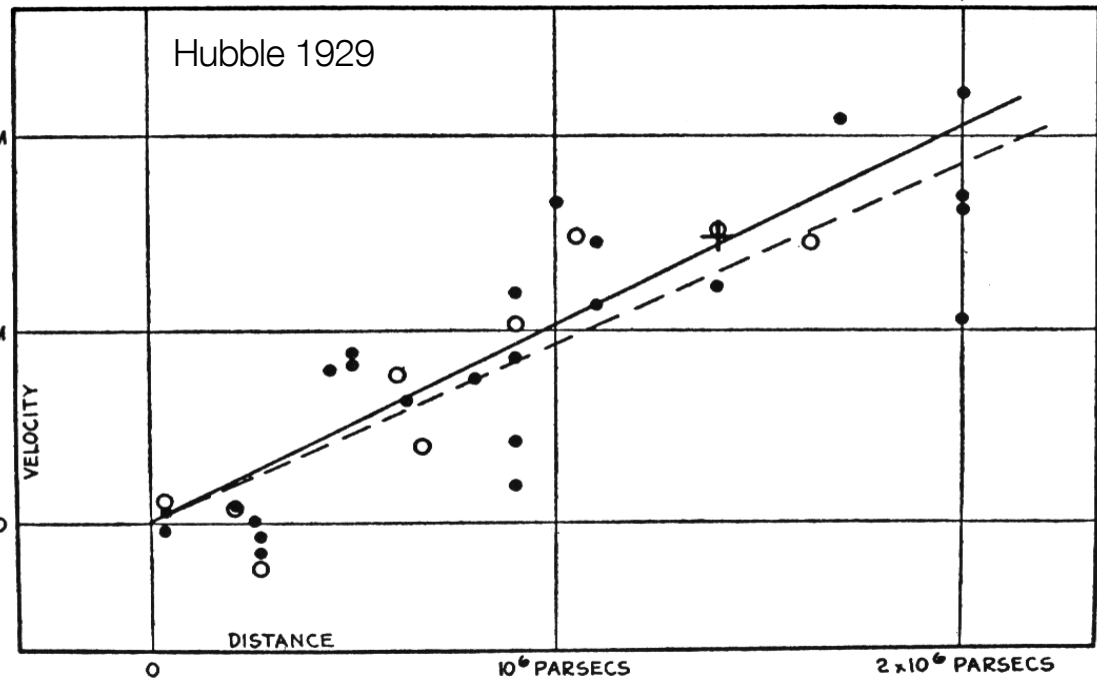
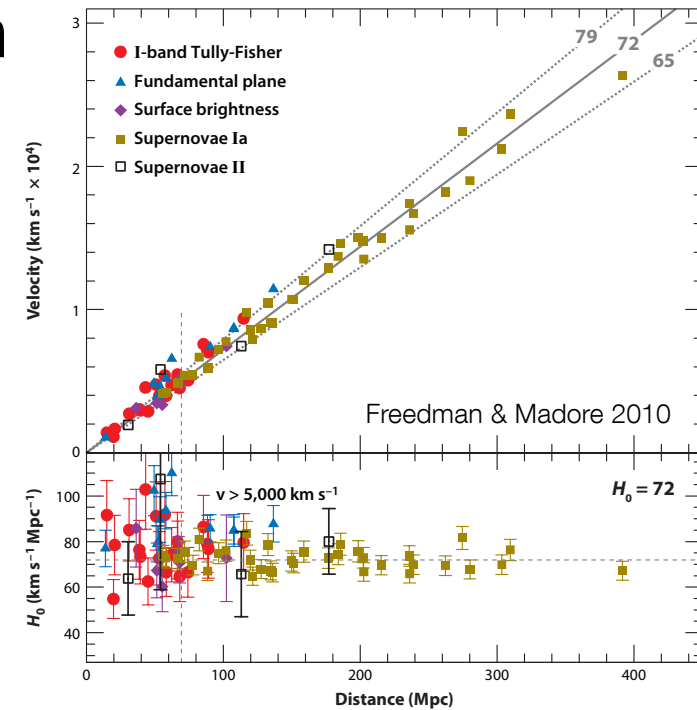


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

Das Hubble-Lemaître Diagramm heute

Verschiedene Entfernungskindikatoren

- Wichtige Prüfung
 - Große Magellansche Wolke
- Galaxien
- Supernovae



Die Ausdehnung des Universums

Alle Galaxien starten am selben Punkt

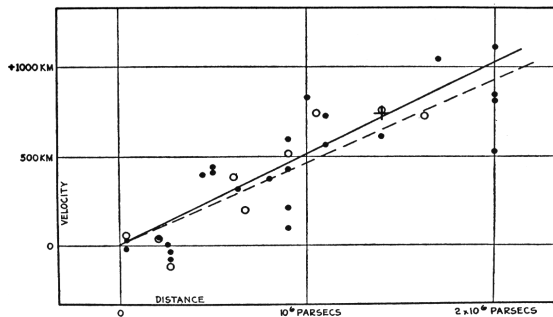
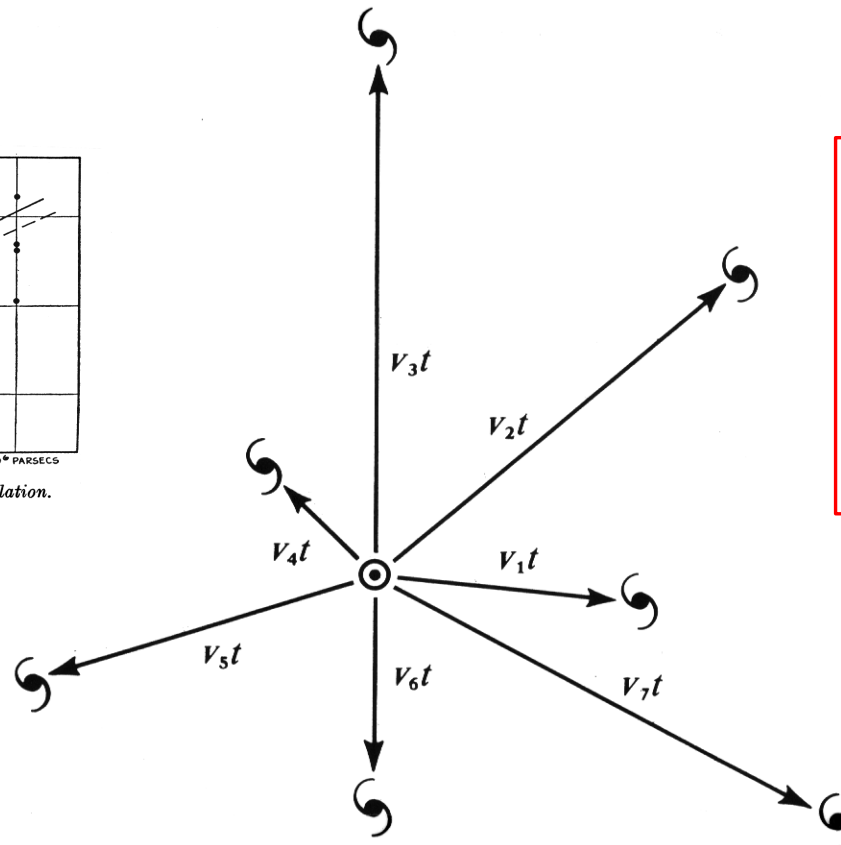
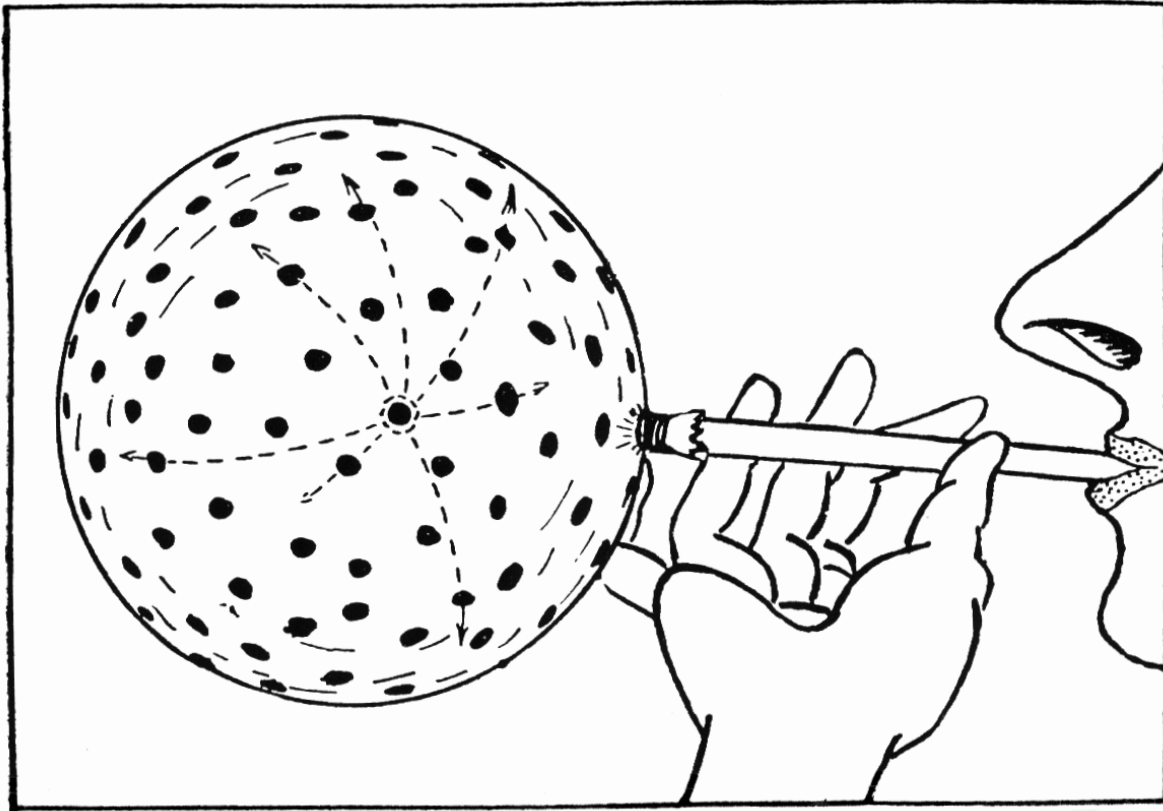


FIG. 9. The Formulation of the Velocity-Distance Relation.

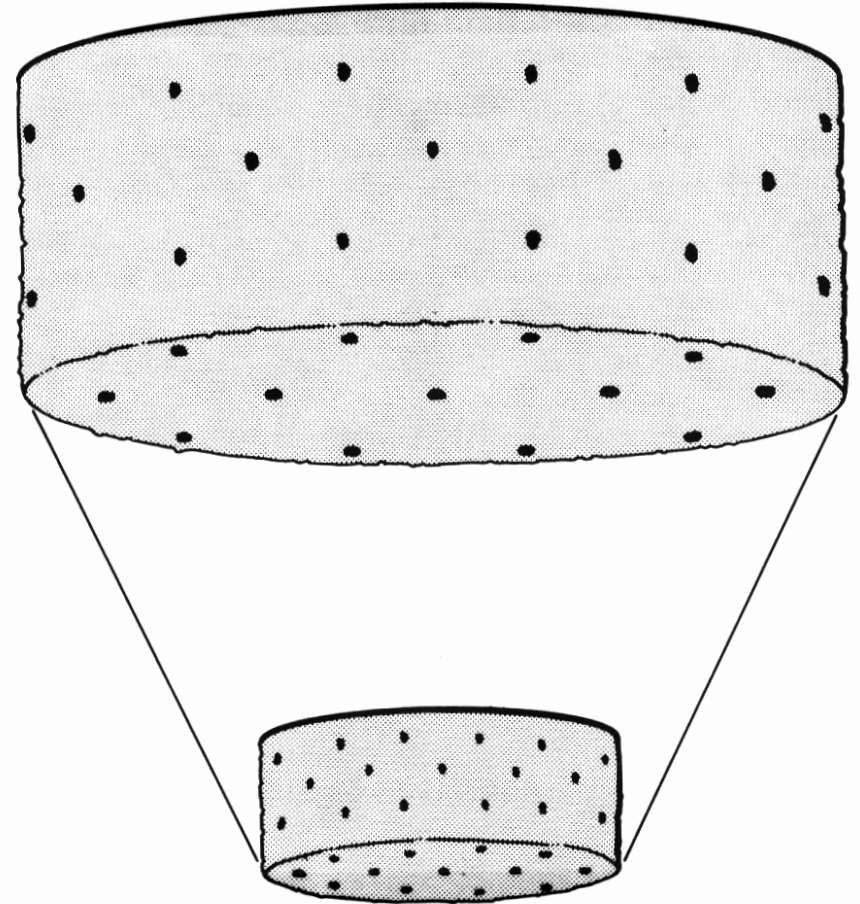


Hubble-Lemaître Gesetz
 $v = H_0 D$
und damit die Expansion
 $H_0 = \frac{v}{D}$

The Expansion ist für alle gleich



26 Februar 2020



Bruno Leibundgut



STScI

Das Hubble-Lemaître Gesetz

Beschreibt die lineare Ausdehnung des (nahen) Universums

$$v = H_0 \cdot D$$

mit der Hubble Konstante H_0 als der Expansionsrate heute.

Die Einheit von H_0 ist inverse Zeit

$$[H_0] = \left[\frac{v}{D} \right] = \frac{km}{s \cdot Mpc} = \frac{1}{s}$$

$$1 Mpc = 3.09 \cdot 10^{19} km = 3.3 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre}$$

Damit entspricht die Hubble Konstante auch dem Alter des Universums.



© Wikimedia

Das Alter des Universums

In einem materie-dominierten Universum ist das Alter

$$t_0 = \frac{2}{3H_0}$$

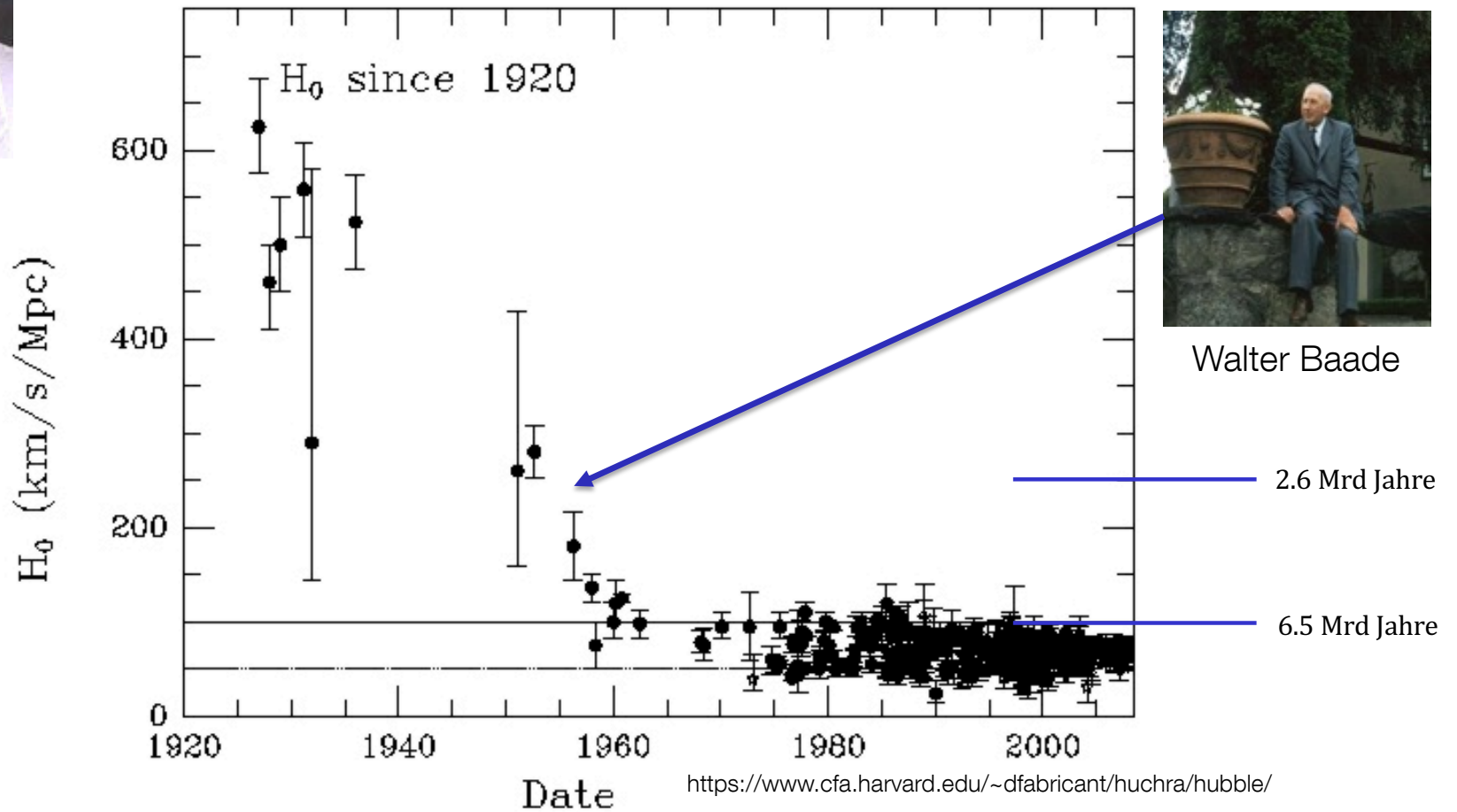
H_0 (km/s/Mpc)	t_0 (yr)
500	$1.30 \cdot 10^9$
250	$2.61 \cdot 10^9$
100	$6.52 \cdot 10^9$
80	$8.15 \cdot 10^9$
70	$9.32 \cdot 10^9$
60	$1.09 \cdot 10^{10}$
50	$1.30 \cdot 10^{10}$
30	$2.17 \cdot 10^{10}$

- Alter der Erde: $4.5 \cdot 10^9$ Jahre
- Alter der ältesten Sterne: $\sim 1.2 \cdot 10^{10}$ Jahre



J. Huchra

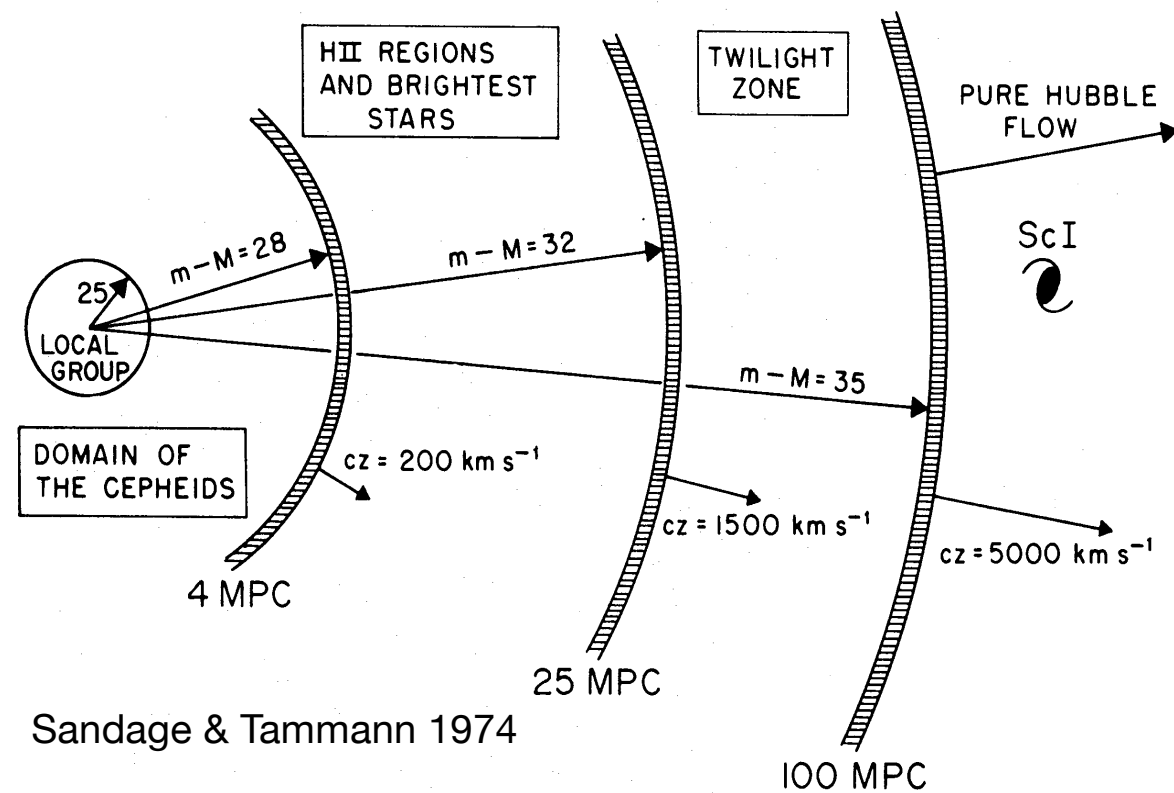
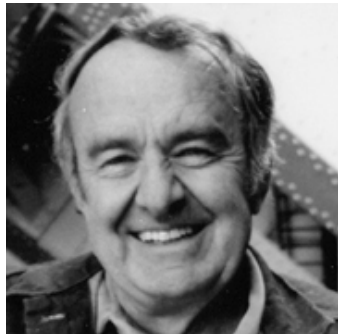
Geschichtliche Entwicklung von H_0



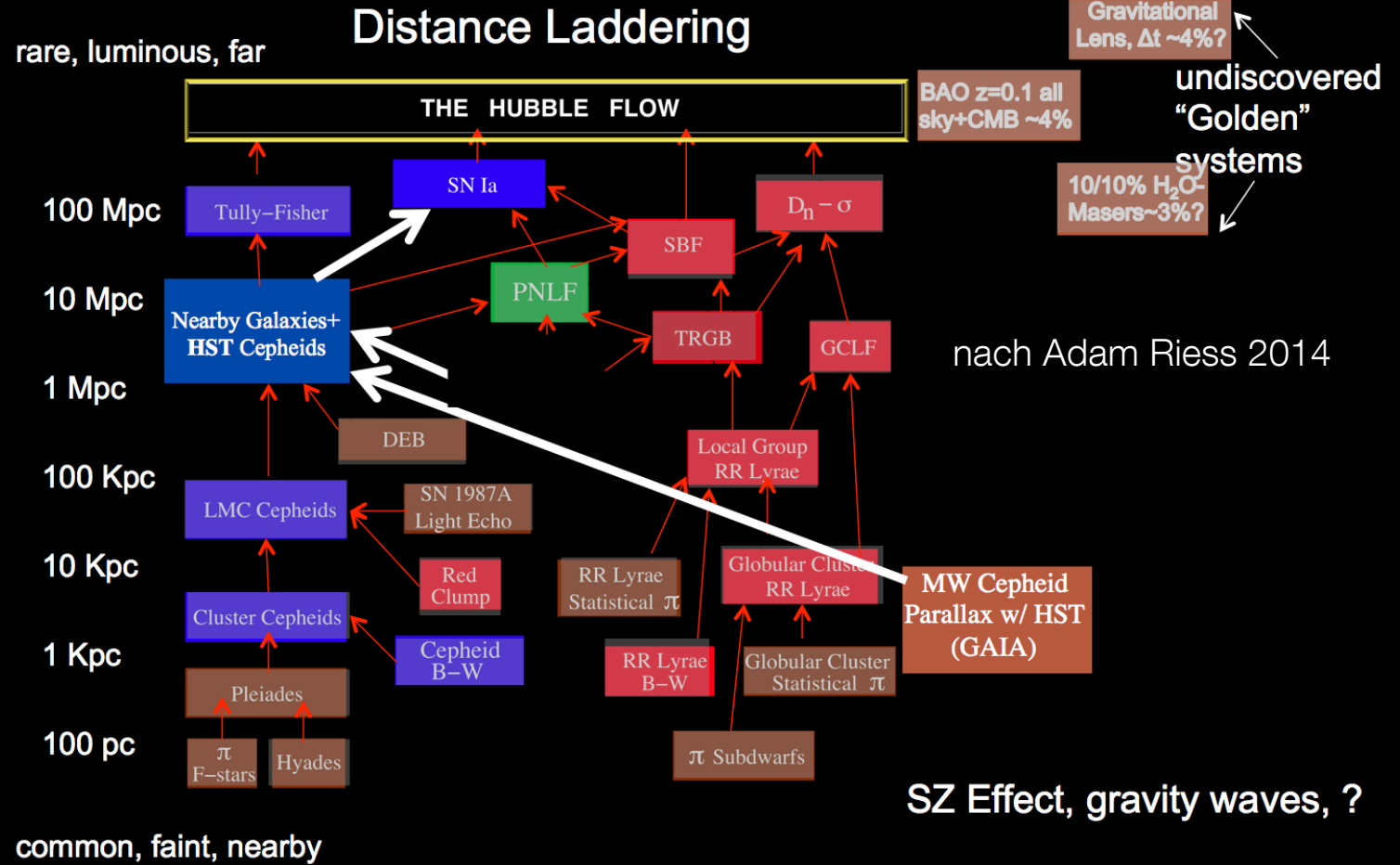
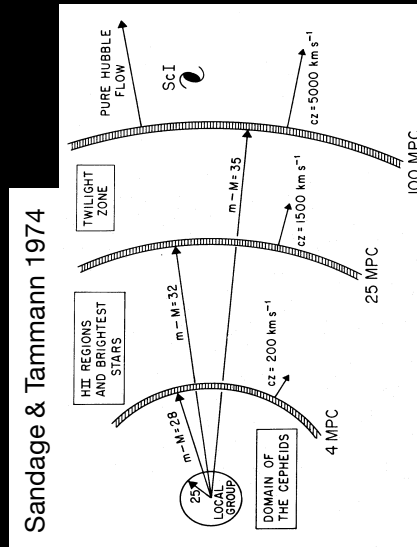
Walter Baade

Messungen der Hubble Konstante H_0

Entfernungsleiter um die Hubble Expansion zu erreichen



Die Entfernungsleiter





Gruber Cosmology Prize

Jeremy Mould
Wendy Freedman
Robert Kennicutt

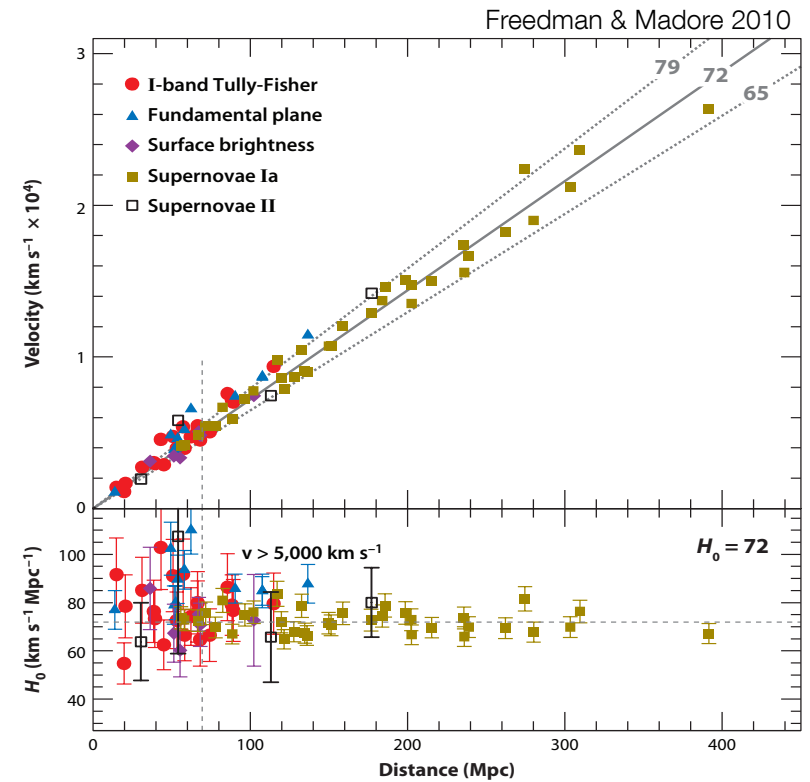
Hubble Key Project

Bestimmung von verschiedenen
Eichungen in der
Entfernungsleiter

- Galaxien
- Supernovae

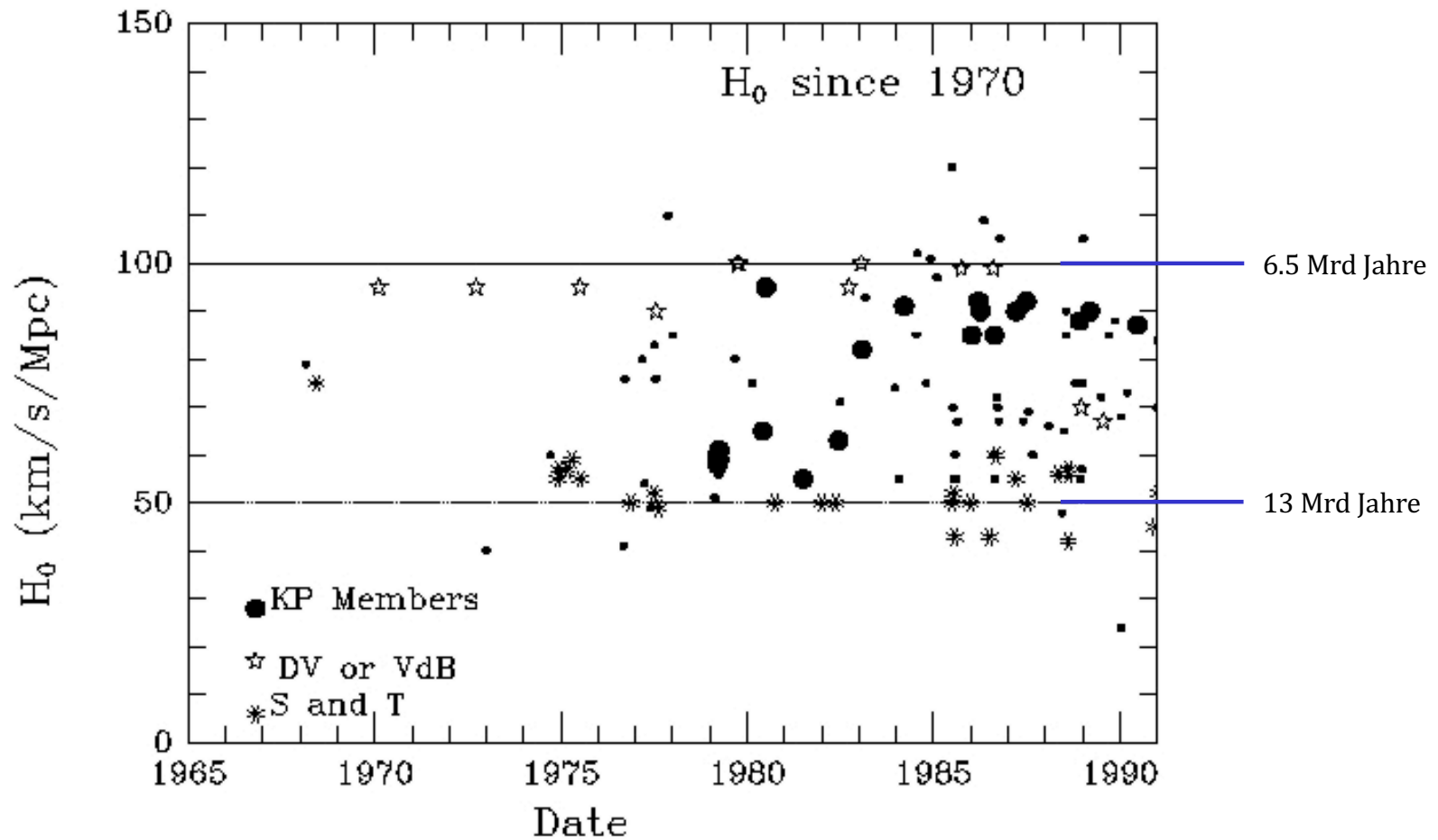


26 Februar 2020

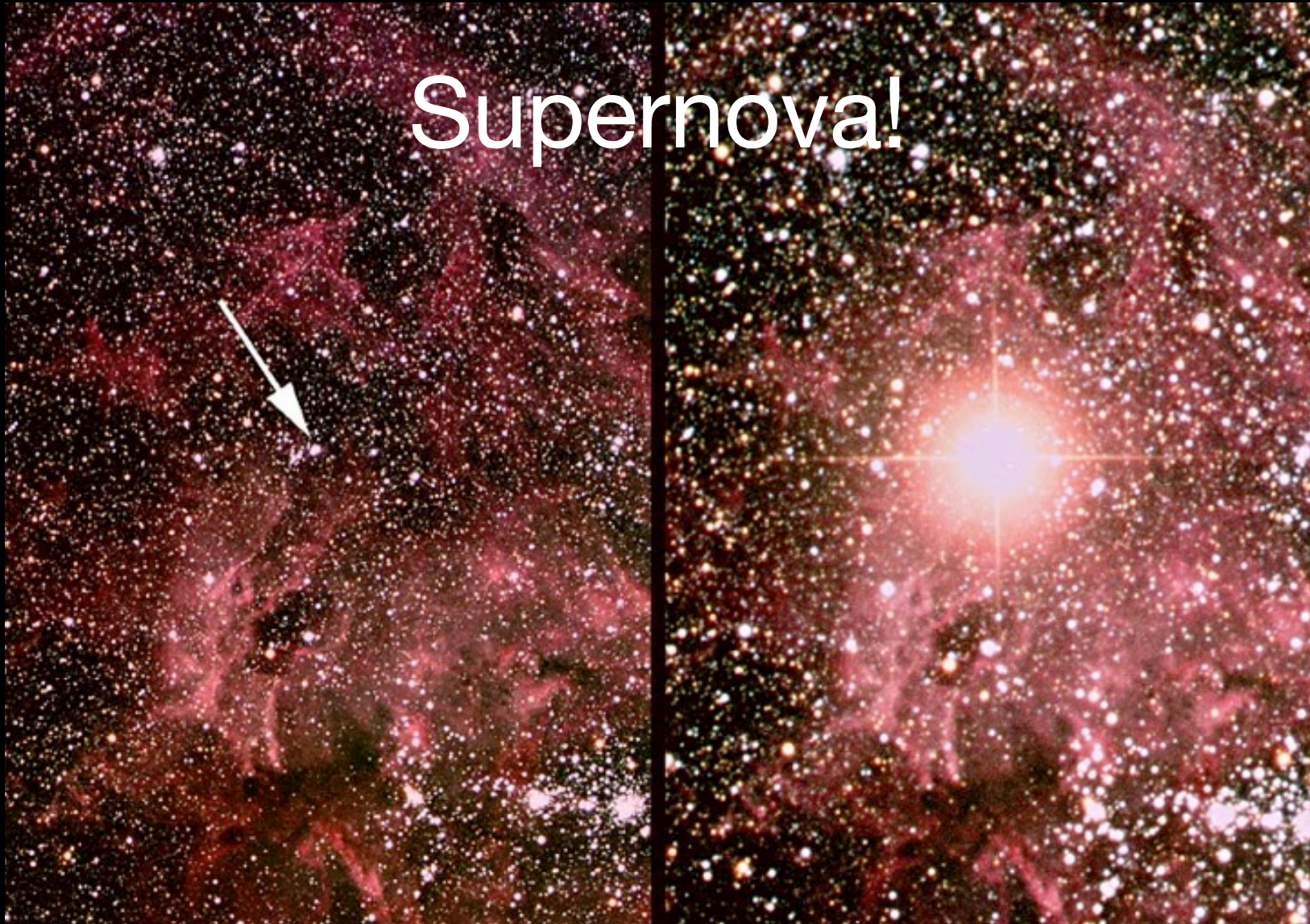


Bruno Leibundgut

Geschichtliche Entwicklung von H_0



Supernova!



26 Februar 2020

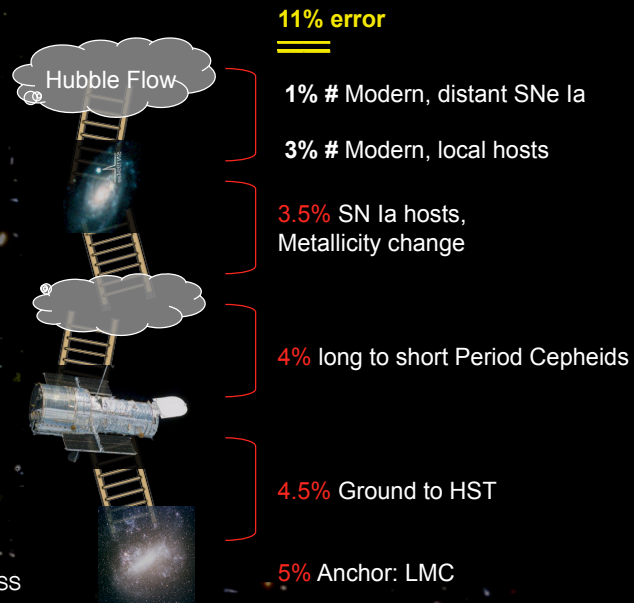
Bruno Leibundgut



Die Hubble Konstante (Entfernungsleiter)

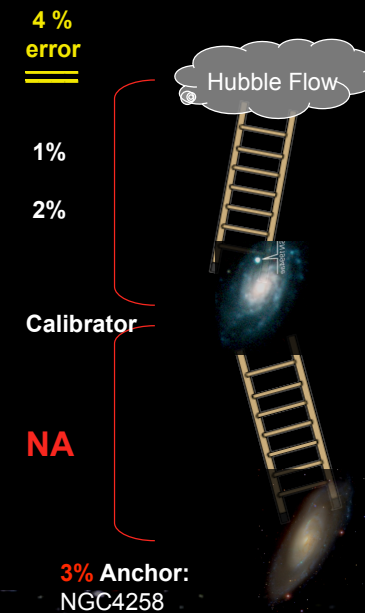
Eichung der Leuchtkraft von Typ Ia Supernovae am Maximum (*SN Ia @ max*)

PAST DISTANCE LADDER (100 Mpc)



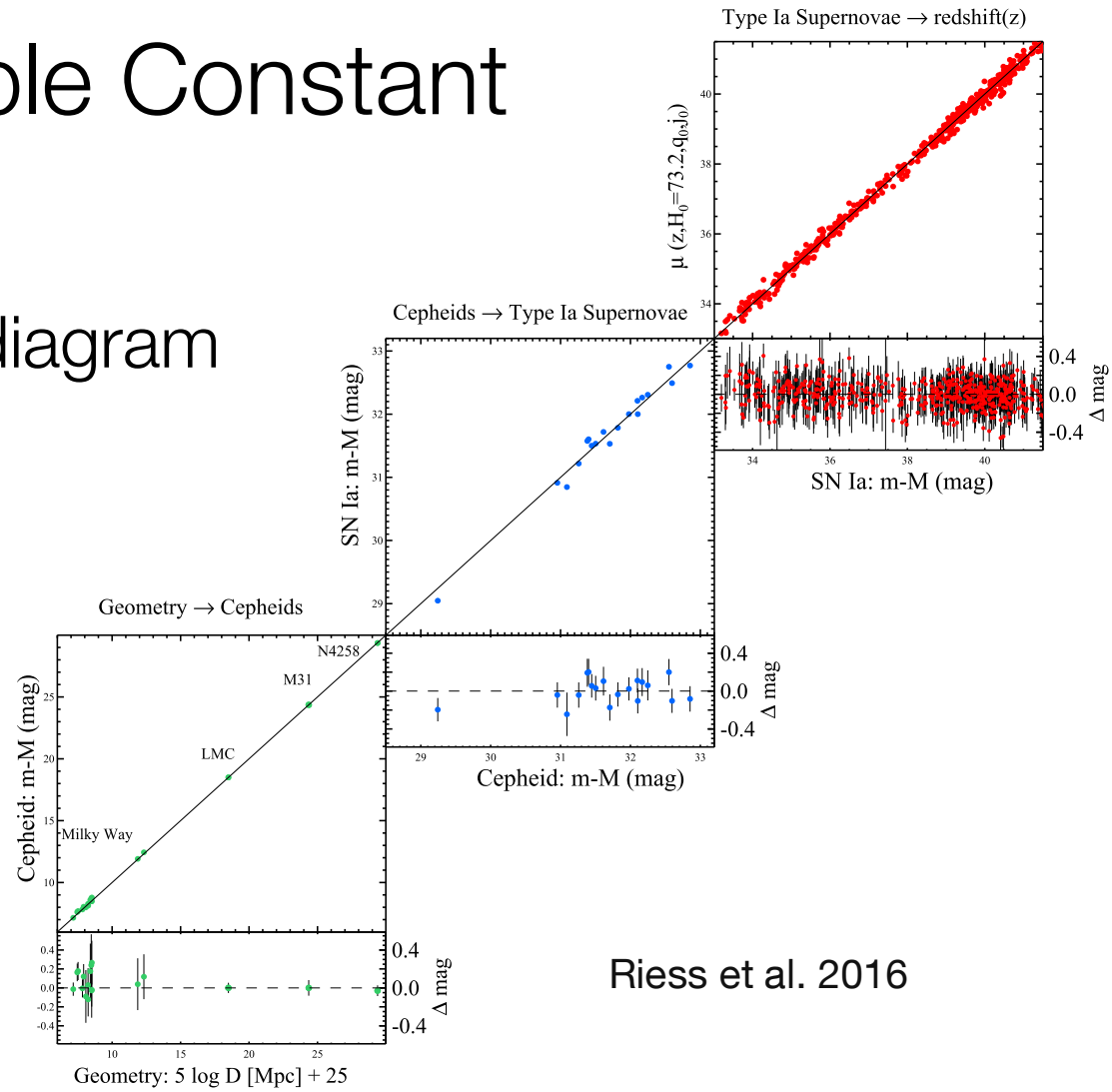
Adam Riess

NEW LADDER (100 Mpc)



Hubble Constant

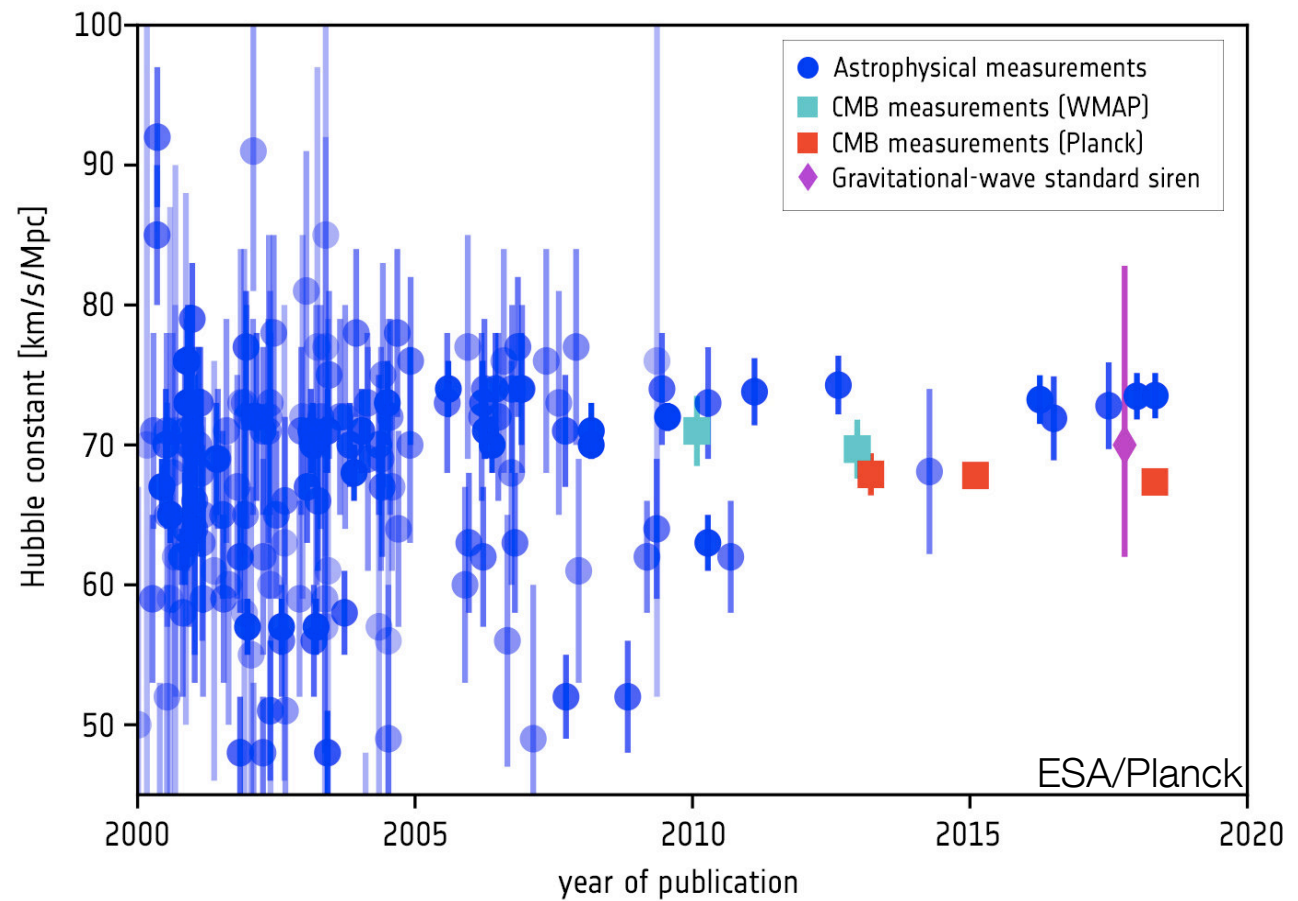
Supernova Ia
Hubble-Lemaître diagram



Riess et al. 2016

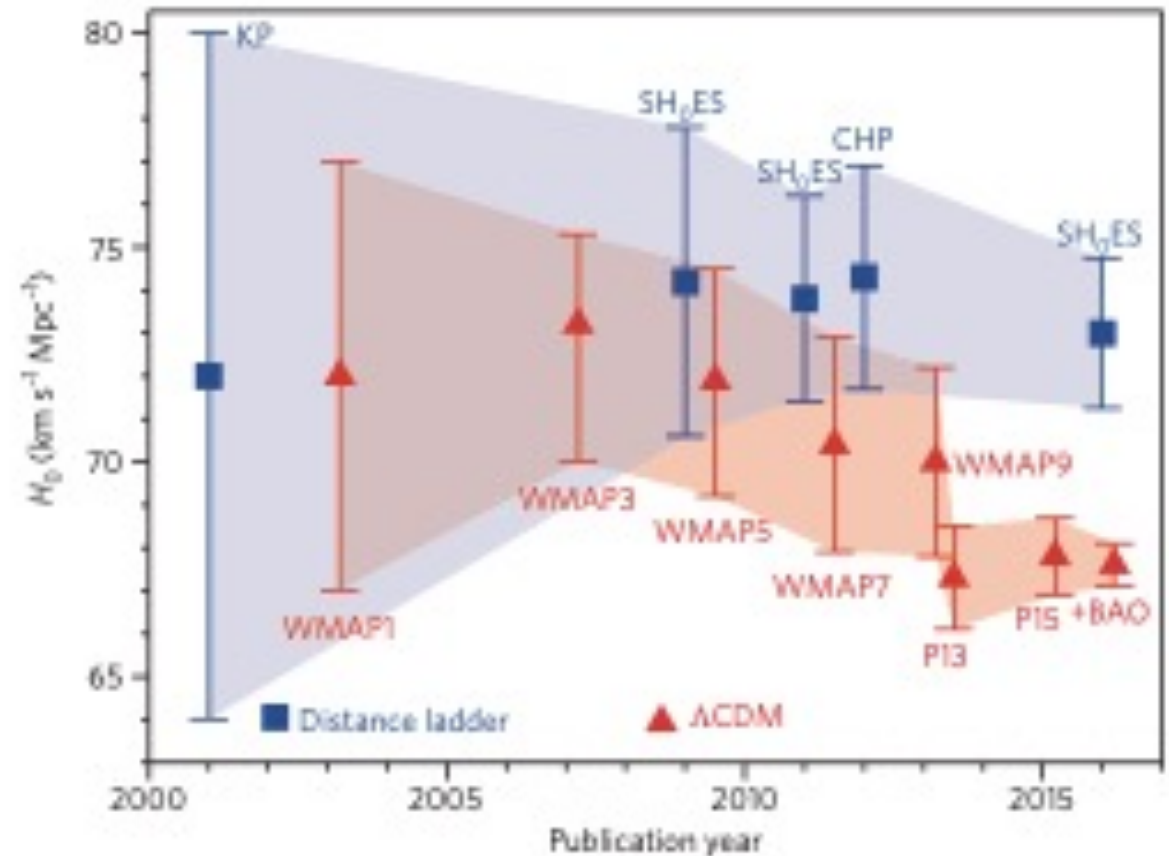
Geschichte von H_0

Nach 2013 eine starke Fokussierung auf $68 < H_0 < 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

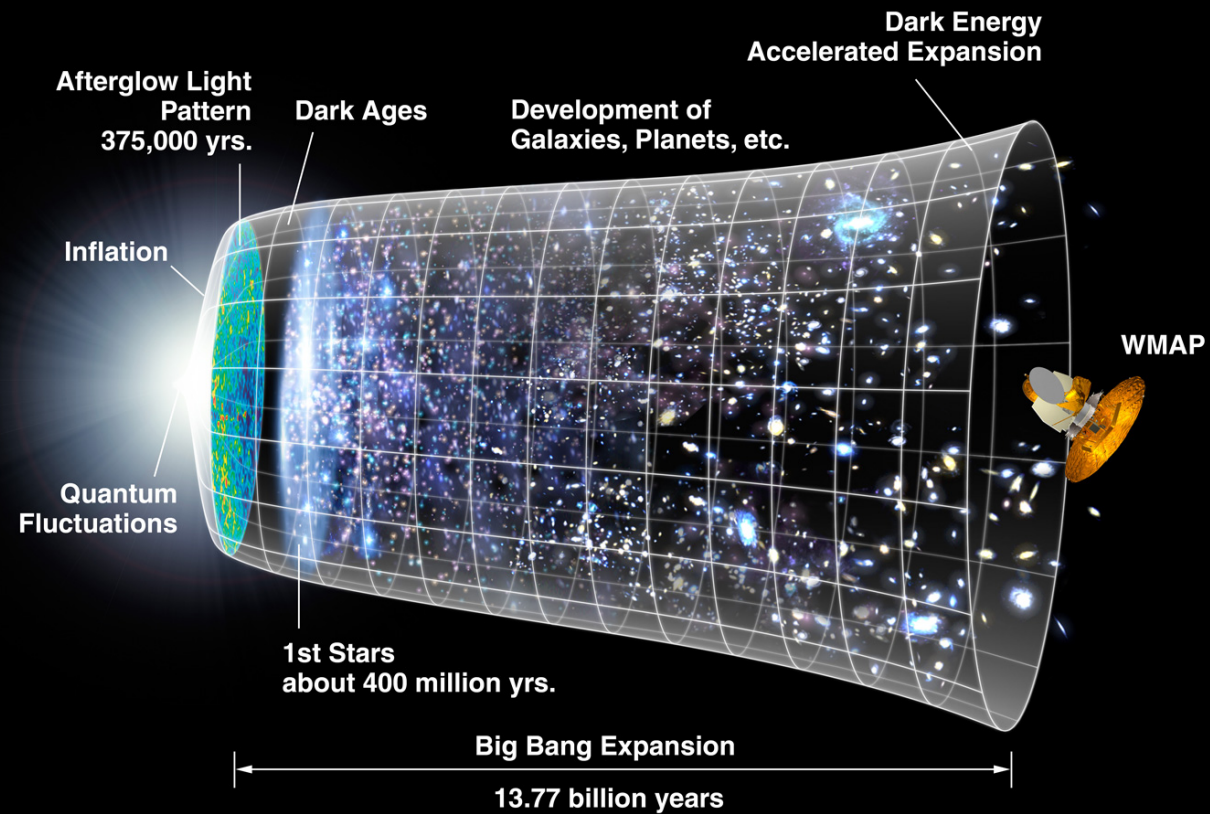


Problem gelöst?

Neue Diskrepanz zwischen nahen (Entfernungsleiter) und entfernten (Kosmischer Mikrowellenhintergrund) Bestimmungen von H_0
Hinweise auf ein unvollständiges kosmologisches Modell?



Kosmischer Mikrowellenhintergrund

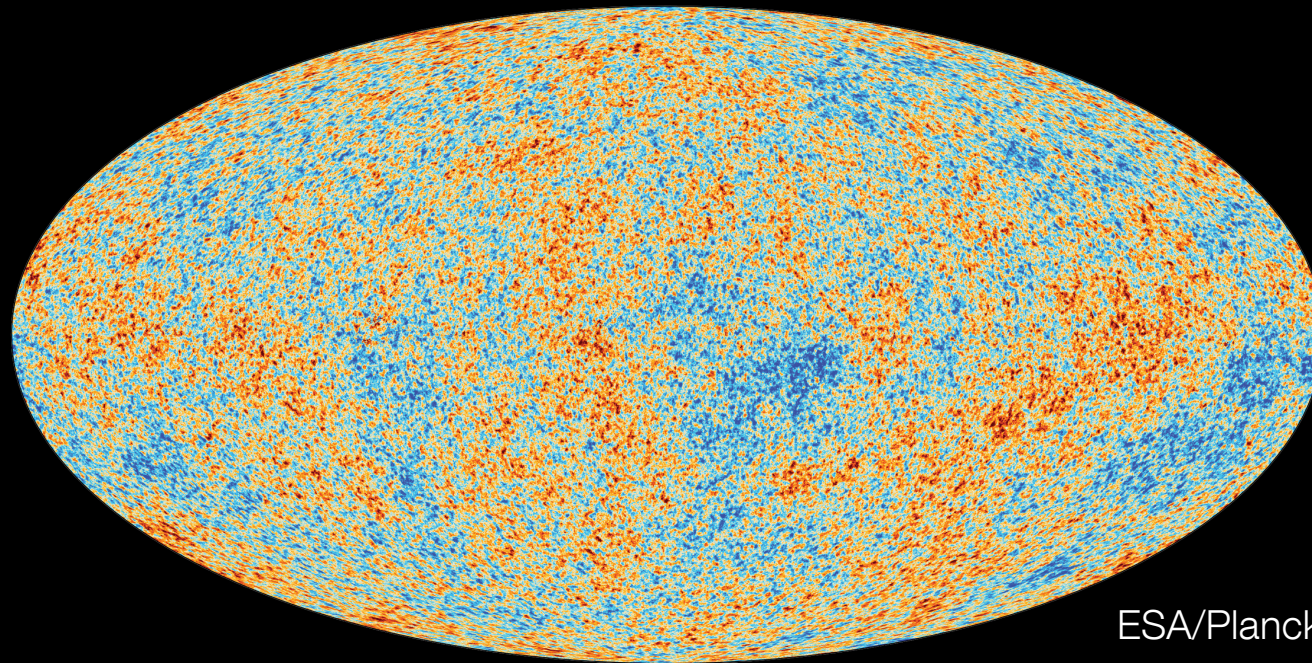


NASA/WMAP Science Team

Kosmischer Mikrowellenhintergrund

Strahlungsüberreste des Urknalls

- Schwarzkörper-Strahlung mit $T=2.73\text{ K}$
- 370000 Jahre nach dem Urknall abgestrahlt

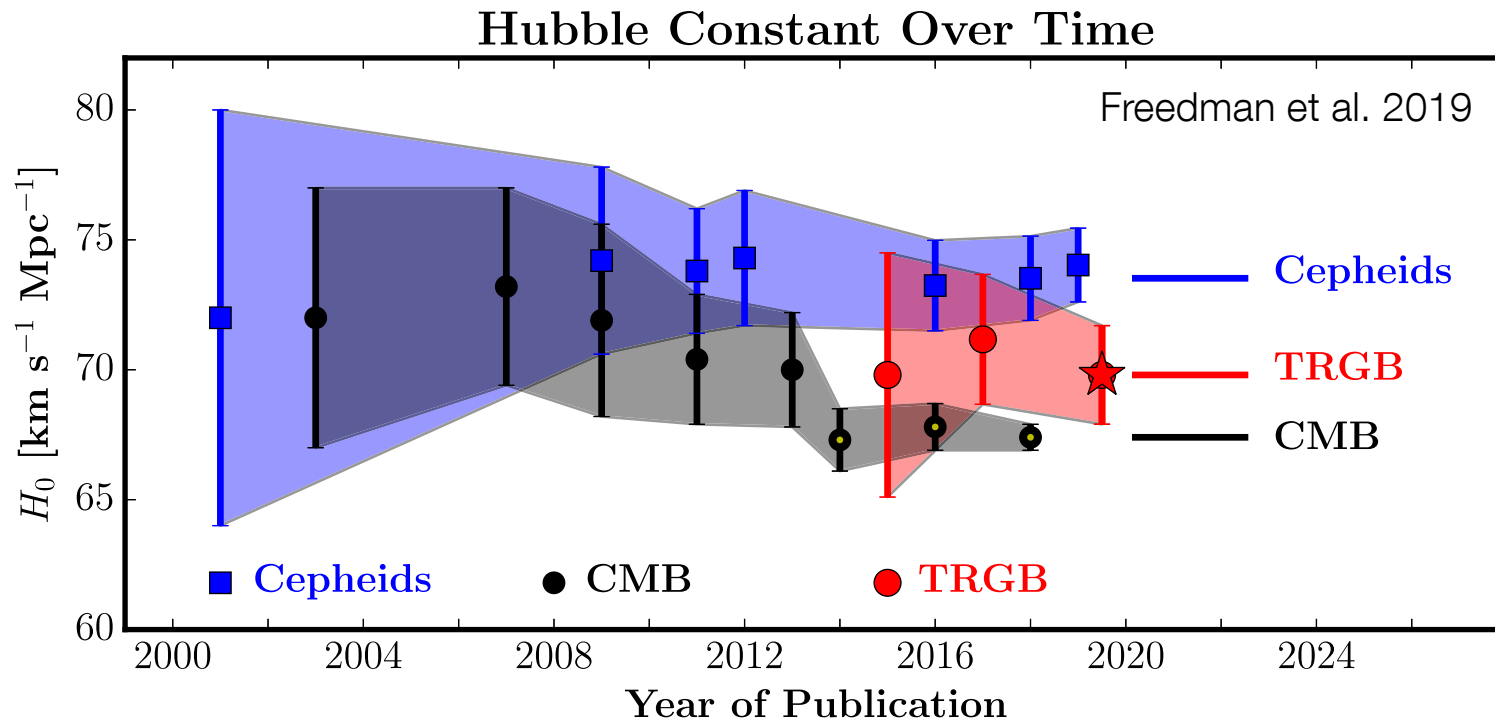


ESA/Planck



Weitere Versuche

RR Lyrae Sterne und Rote Überriesen Sterne

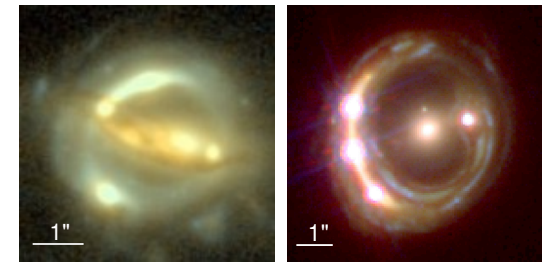
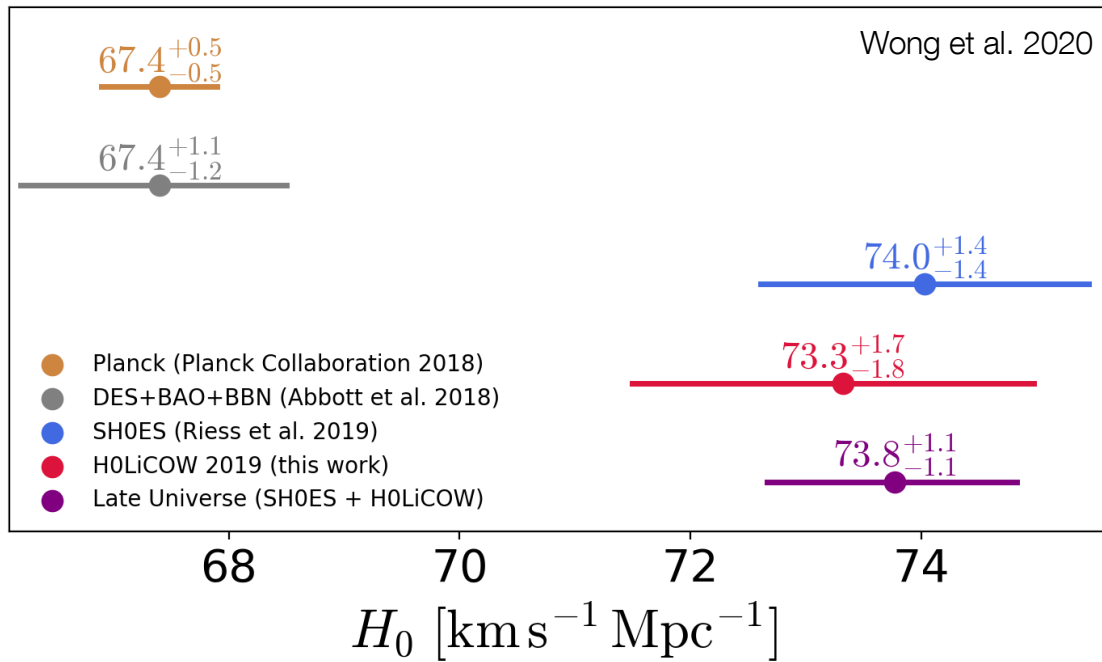




Gravitationslinsen

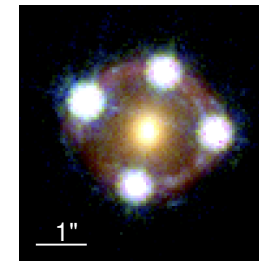
HOLICOW Zusammenarbeit
(Sherry Suyu/TUM)

flat Λ CDM

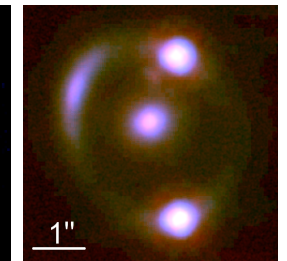


(a) B1608+656

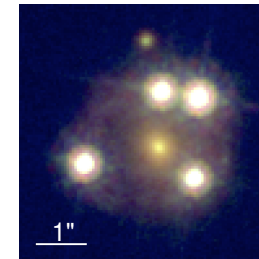
(b) RXJ1131-1231



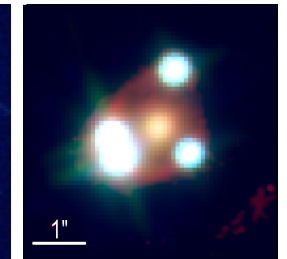
(c) HE 0435-1223



(d) SDSS 1206+4332



(e) WFI2033-4723



(f) PG 1115+080

Bruno Leibundgut

Zusammenfassung

Die Hubble Konstante bestimmt die Skala und das Alter des Universums

– Vergangene Probleme gelöst

- Das Universum ist älter als die Erde
 - Verschiedene Sternpopulationen (Walter Baade)
- Alter des Universums ist auch größer als das Alter der ältesten Sterne
 - Expansionsgeschichte durch Supernovae (Kosmologische Konstante)
(Saul Perlmutter, Brian Schmidt, Adam Riess)



Bruno Leibundgut

Zusammenfassung

Entfernungsleiter inzwischen nur noch in zwei Schritten

- Eichung der Cepheiden Sterne
 - bald mit geometrischen Methoden (Parallaxen)
- Eichung der Supernovae durch Cepheiden Sterne

Kosmische Mikrowellenhintergrund

- Lösung des kosmologischen Modells

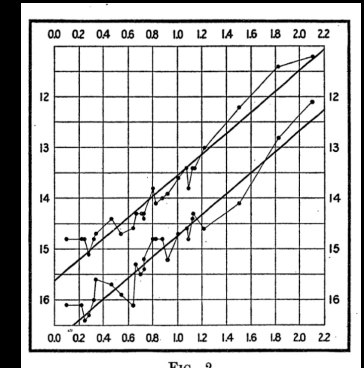
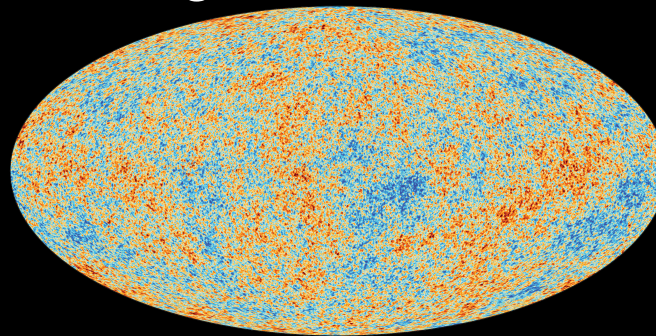


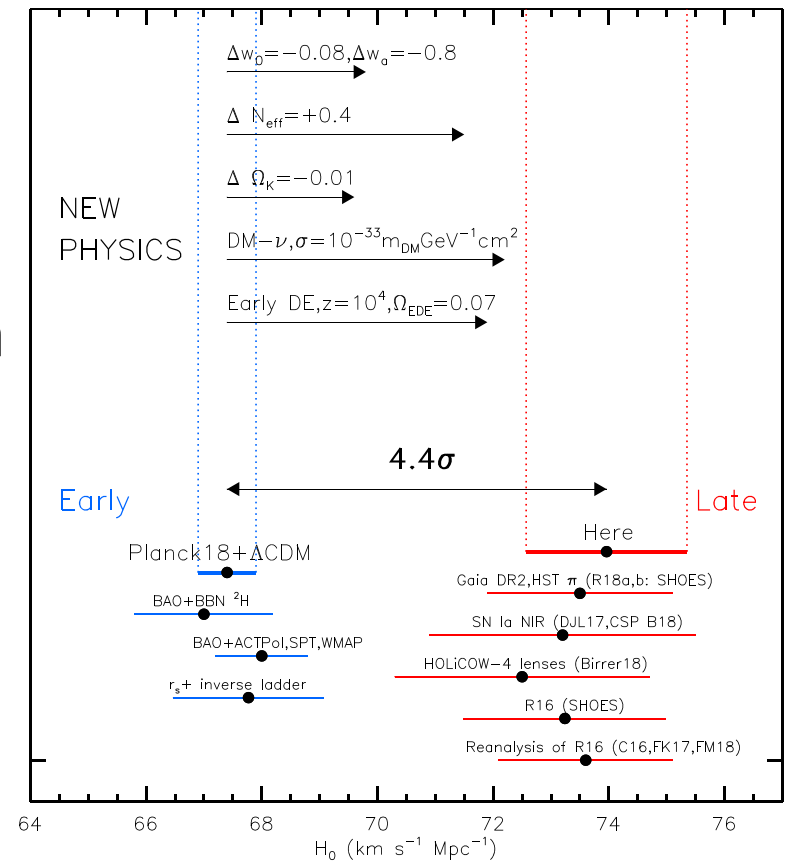
Fig. 2.



Zusammenfassung

- Falls die Messungen stimmen,
- ist das kosmologische Modell noch unvollständig
 - ist das kosmologische Modell falsch

Riess et al. 2019



100 Jahr Fortschritt

Kosmische Ausdehnung fest verankert.

Die Fehler sind um einen Faktor 100 reduziert worden.

Das kosmologische Modell, basierend auf der Gravitation der Allgemeinen Relativitätstheorie, umfasst Materie (uns), Strahlung (Mikrowellenhintergrund), Dunkle Materie (?) und Dunkle Energie (??).