

Historie astronomie XI.

Mimogalaktická astronomie

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



Astronomie počátkem 20. století

Astronomie = astrofyzika, využívá

- fyzikální teorie, metody
- fotografické a spektroskopické metody
- dalekohledy, přístroje
- důsledné matematické zpracování výsledků

→ úplnější astronomický obraz vesmíru

Počátky výzkumu galaxií

Jaká je podstata mlhovin?

Jak se pohybují?

Můžeme určit jejich vzdálenosti?

Jaké je jejich prostorové rozložení?

Existuje souvislost mezi vzdáleností a rychlostí pohybu mlhovin - galaxií?

Debata r. 1920 **Shapley** x **Curtis**

Co představují mlhoviny ?

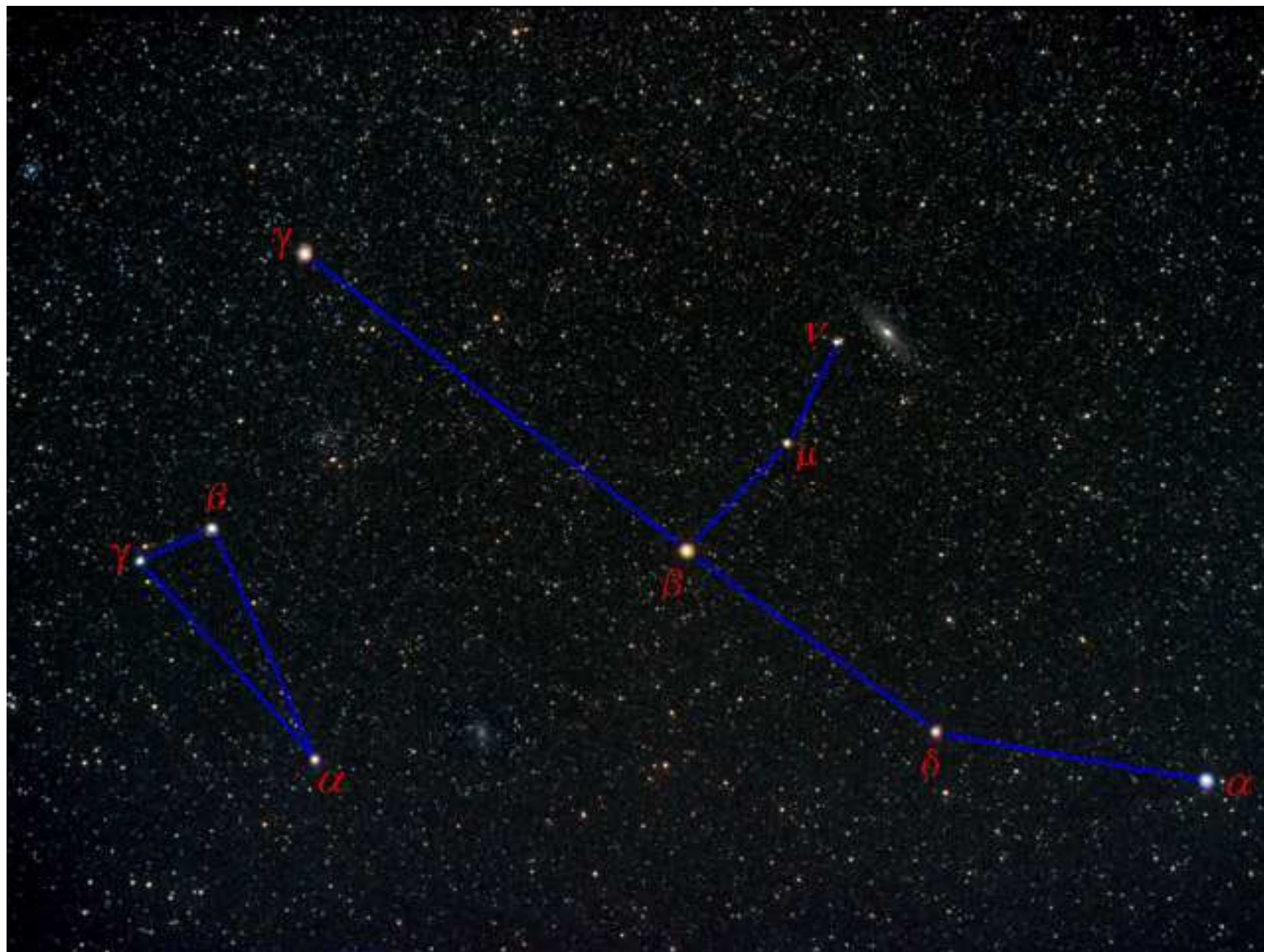


Harlow Shapley
(Mt. Wilson Obs.)



Heber Curtis
(Lick Observatory)

galaxie M 31 v souhvězdí Andromedy



Závěry diskuse H.Shapley x H.D.Curtis - 1920

Harlow Shapley 1885 - 1972:

pomocí studia kulových hvězdokup zjistil polohu středu Galaxie a její rozměry

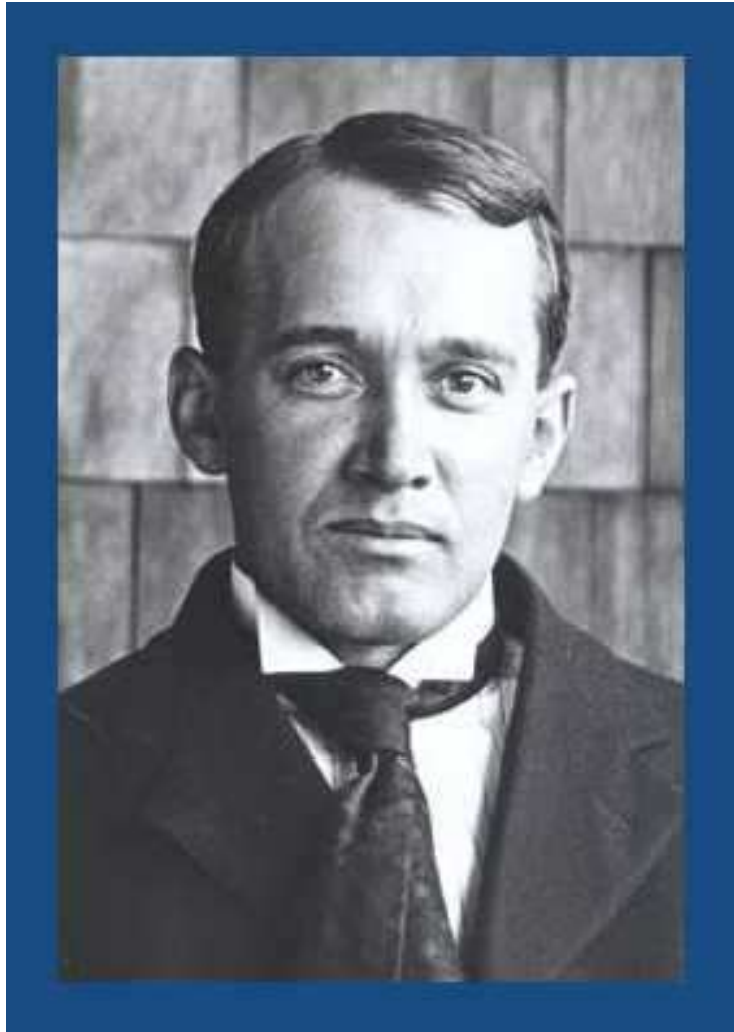
vesmír je tvořen naší Galaxií, mlhavé obláčky jsou blízka plynná mračna

Herbert Doust Curtis 1872 - 1942:

vesmír je složen z mnoha galaxií jako je naše, Slunce leží v blízkosti středu jedné z galaxií

Měření radiálních rychlostí galaxií

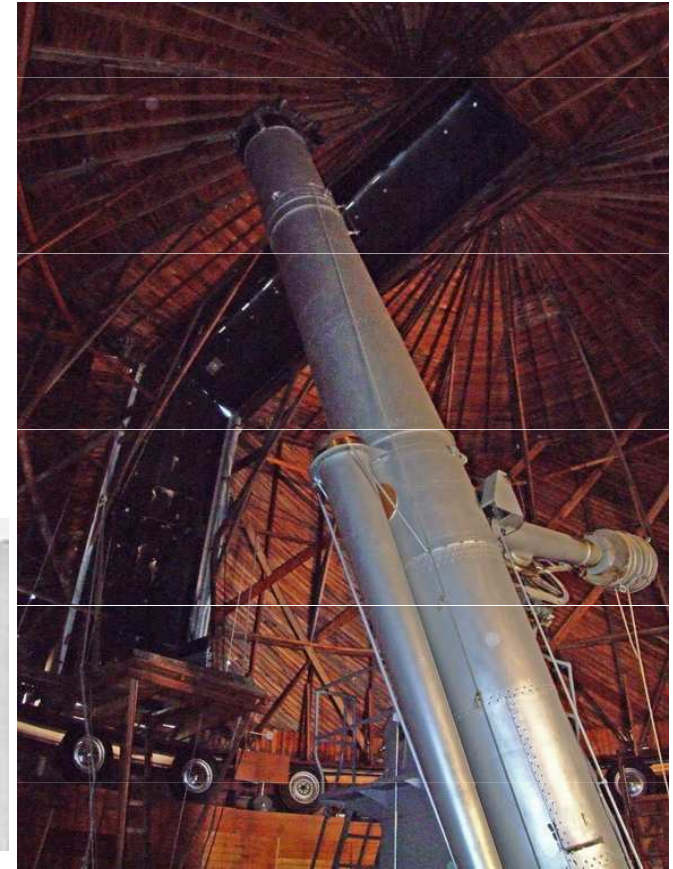
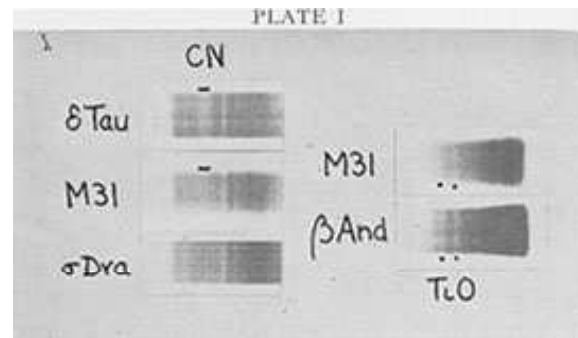
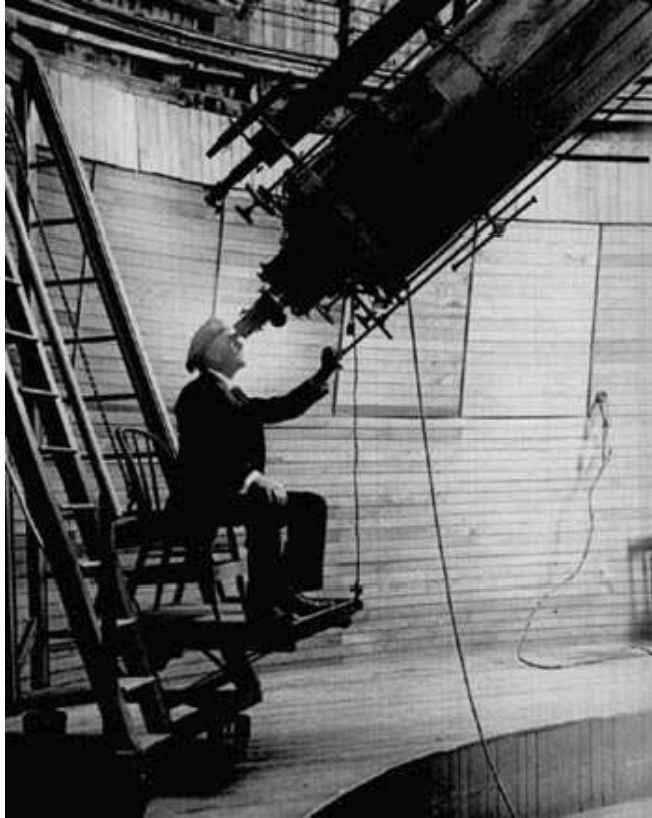
Vesto Melvin Slipher
1875 - 1969



Milton Lasell Humason
1891 - 1972



Lowell Observatory - V. M. Slipher: první stanovení radiální rychlosti mlhoviny M 31



4. prosince 1912, 14 hodinová expozici
→ spektrum → radiální rychlost – 300 km.s^{-1}
roku 1914 - 40 spekter mlhovin
u 15 určena radiální rychlost

Lowell Observatory - V. M. Slipher:
Popular astronomy, **23**, (1915), p. 21

Spektrografická pozorování mlhovin

SPECTROGRAPHIC OBSERVATIONS OF NEBULAE.

BY V. M. SLIPHER.

During the last two years the spectrographic work at Flagstaff has been devoted largely to nebulae. While the observations were chiefly concerned with the spiral nebulae they also include planetary and extended nebulae and globular star clusters.

Nebular spectra may be broadly divided into two general types (1) bright-line and (2) dark-line. The so-called gaseous nebulae are of the first type; the spiral nebulae of the second type.

Lowell Observatory - V. M. Slipher: Popular astronomy, 23, (1915), p. 21 Spektrografická pozorování mlhovin – radiální rychlosti

In the table is a list of the spiral nebulae observed. As far as possible their velocities are given, although in many cases they are only rough provisional values.

N.G.C.	221	Velocity	— 300 km	} These nebulae are on the south side of the Milky Way.
	224 †		— 300	
	598		—	
	1023		+ 200 roughly	
	1068		+ 1100	
	7331		+ 300 roughly	
	3031		+ small	} These are on the north side of the Milky Way
	3115		+ 400 roughly	
	3627		+ 500	
	4565		+ 1000	
	4594		+ 1100	
	4736		+ 200 roughly	
	4826		+ small	
	5194		± small	
	5866		+ 600	

J. H. Reynolds: Motion in the spiral nebulae

Observatory No. **40**, (1917) p. 131

Pohyb spirálních mlhovin – radiální rychlosti

obtížnost spektroskopických pozorování na
Mount Wilson

When we bear in mind that a displacement of .01 mm. on this scale equals a radial velocity of something like 90 kms. per second, and that the total exposure is 80 hours spread over several nights, it is evident that slight differences of temperature and tension in the spectrograph, as well as the fact that the comparison-spectrum is only exposed for a few seconds at the end of the exposure, are quite sufficient to introduce a large probable error. In the case of N.G.C. 4594 the result is in close agreement with that derived by Slipher, but there was no such agreement in the case of the Andromeda Nebula, Slipher giving a velocity of -300 kms. per second, whereas Wolf's result is -450 kms. per second.

Lowell Observatory - V. M. Slipher:

Radial velocity observations of spiral nebulae
Observatory 40, (1917), p. 304.

Měření radiálních rychlostí spirálních mlhovin

Mr. Reynolds referred to observations of the velocity of the Great Andromeda Nebula as bearing out his criticism. The results of this object known to me are the following:—

—300	km.	Slipher; from several plates.
—304	„	Wright (Lick); from one plate.
—300–400	„	Wolf; one plate, which he believed not “good enough to give any security.”
—329	„	Pease (Mt. Wilson); from one plate.

When we bear in mind that Wolf did not consider his plate “good enough,” we can, it seems to me, look upon these results as in satisfactory agreement.

25 radiálních rychlostí, 21 kladných
(-300 + 1 100) km.s⁻¹

Radial Velocity Observations of Spiral Nebulae.

GENTLEMEN,—

In the *Observatory*, No. 511, p. 131, Mr. Reynolds has a letter which I fear might lead the reader to suppose that little confidence should be placed in the velocity-observations of spiral nebulae such as I initiated in 1912 and have had in progress since at the Lowell Observatory, and I beg space for a few remarks upon this work.

Mr. Reynolds referred to observations of the velocity of the Great Andromeda Nebula as bearing out his criticism. The results of this object known to me are the following:—

- | | | |
|----------|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| —300 | km. | Slipher; from several plates. |
| —304 | „ | Wright (Lick); from one plate. |
| —300-400 | „ | Wolf; one plate, which he believed not “good enough to give any security.” |
| —329 | „ | Pease (Mt. Wilson); from one plate. |

When we bear in mind that Wolf did not consider his plate “good enough,” we can, it seems to me, look upon these results as in satisfactory agreement.

We would, indeed, be fortunate in science if the inaccuracy of observation were never more than a small fraction of the quantity observed.

I am, Gentlemen,

Yours faithfully,

V. M. SLIPHER.

Lowell Observatory,
Flagstaff, Arizona,
1917, June 15.

Observatoř Mount Wilson



George Hale (1868-1938)

první světlo koncem
roku 1917 $D = 2,5$ m



100-inch Hooker Telescope

Edwin Powell Hubble (1889 - 1953)

vášnivý čtenář - knihy Julese Verna
v mládí sportovec - skok do výšky, box,
studium Chicago BS (fyzika) - asistent u

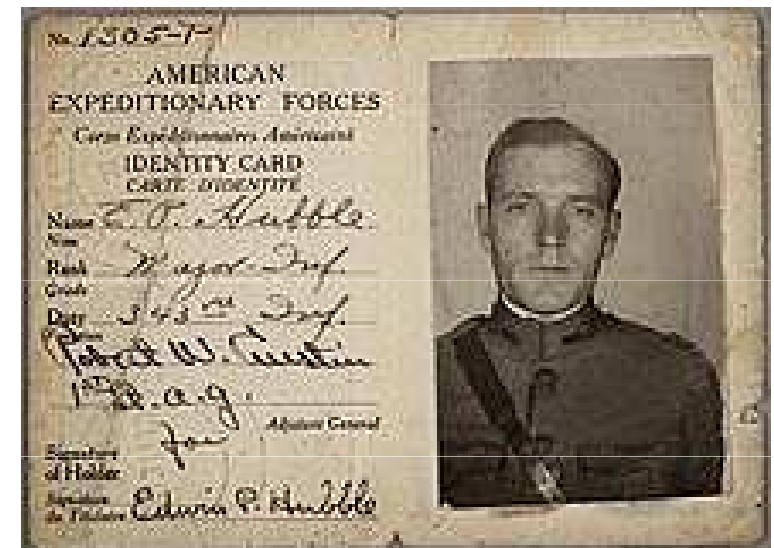
R. A. Millikana, A. Michelsona
další studium Oxford MA (právo)

I. sv. válka - major v armádě

r. 1919 - Mount Wilson, Pasadena

r. 1920 - disertace *Photographia*
Investigation of Faint Nebulae -
Fotografický výzkum slabých
mlhovin

II. sv. válka - vojenský výzkum



Edwin Powell Hubble - mládí



Form 1 **1341** REGISTRATION CARD No. **5155**

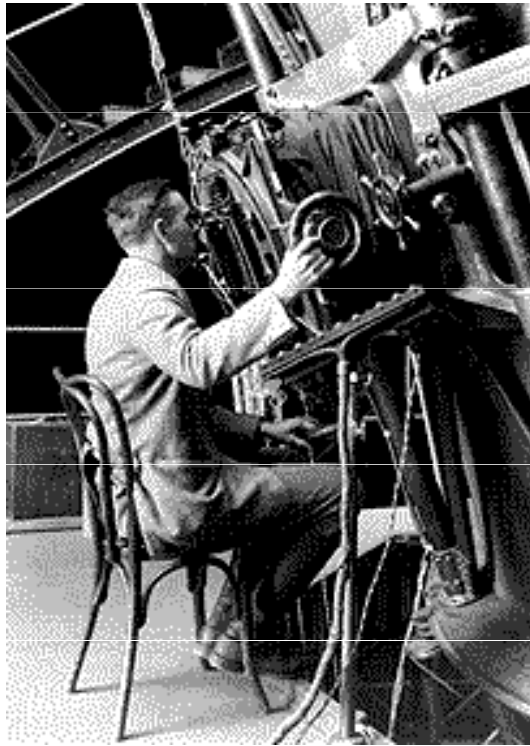
1	Name in full <i>Edwin Powell Hubble</i> <small>(Given name) (Family name)</small>	Age, in yrs. 28
2	Home address <i>Yerkes Observatory William's Bay Wisconsin</i> <small>(No.) (Street) (City) (State)</small>	
3	Date of birth <i>November 20 1889</i> <small>(Month) (Day) (Year)</small>	
4	Are you (1) a native-born citizen, (2) a naturalized citizen, (3) an alien, (4) or have you declared your intention (specify which)? <i>Native-born citizen</i>	
5	Where were you born? <i>Marshfield Missouri U. S. A.</i> <small>(Town) (State) (Nation)</small>	
6	If not a citizen, of what country are you a citizen or subject?	
7	What is your present trade, occupation, or office? <i>Student at Illinois Training Camp Fort Sheridan</i>	
8	By whom employed? <i>University of Chicago (Assistant)</i> Where employed?	
9	Have you a father, mother, wife, child under 12, or a sister or brother under 12, solely dependent on you for support (specify which)? <i>No Mother and sister partly dependent</i>	
10	Married or single (which)? <i>Single</i> Race (specify which)? <i>White</i>	
11	What military service have you had? Rank <i>None</i> ; branch years ; Nation or State	
12	Do you claim exemption from draft (specify grounds)? <i>No</i>	

I affirm that I have verified above answers and that they are true.

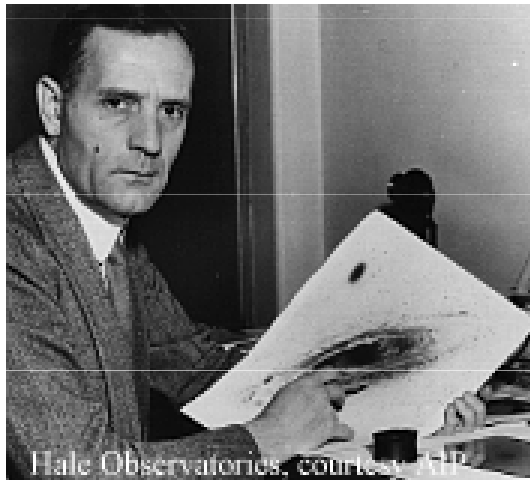
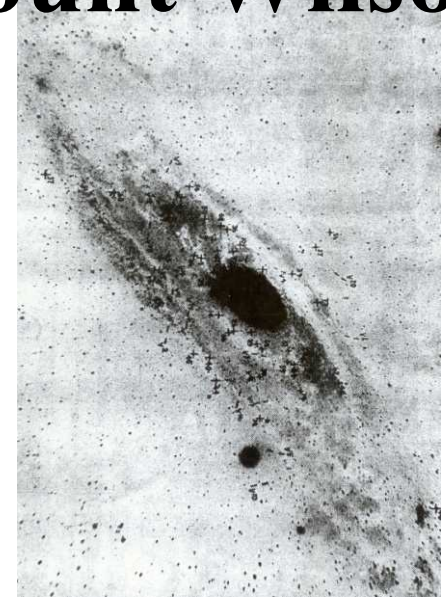
Edwin P. Hubble
(Signature or mark)

If person is of Alien descent, race of his parents

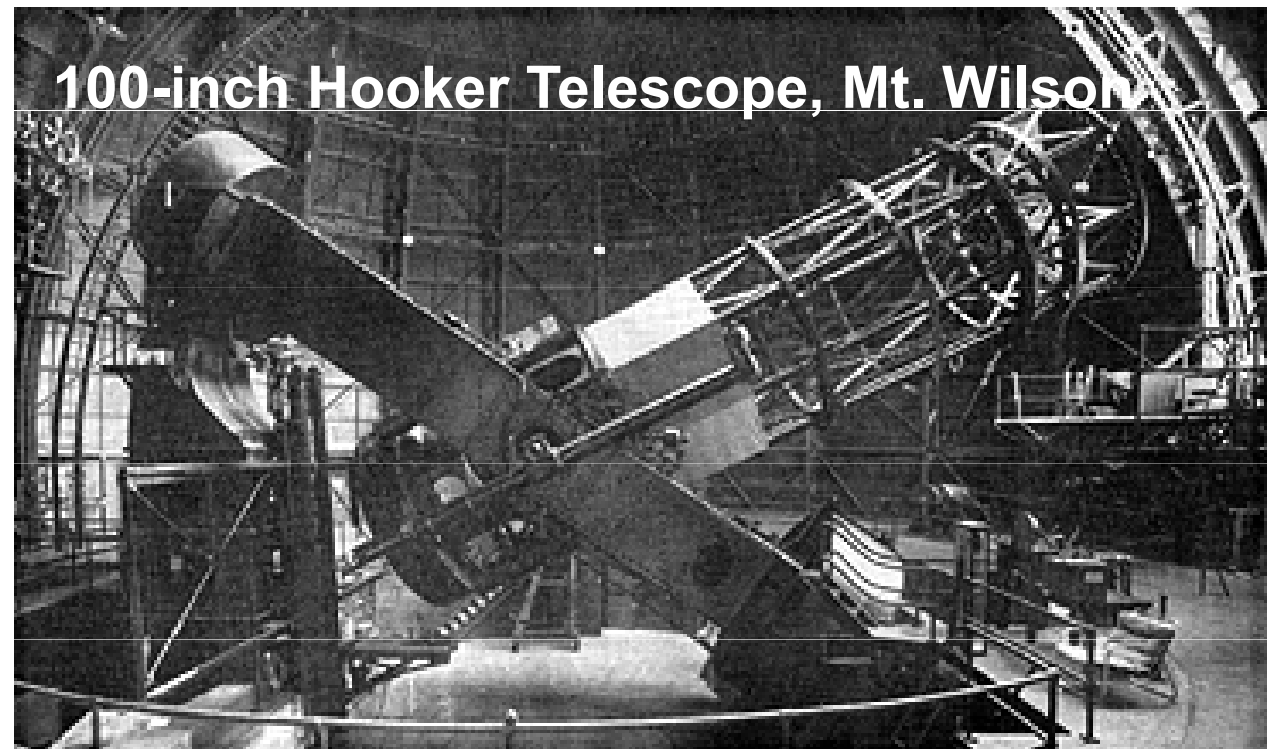
Hubbleův výzkum galaxií na Mount Wilson



**využití
fotografických
desek mlhovin**

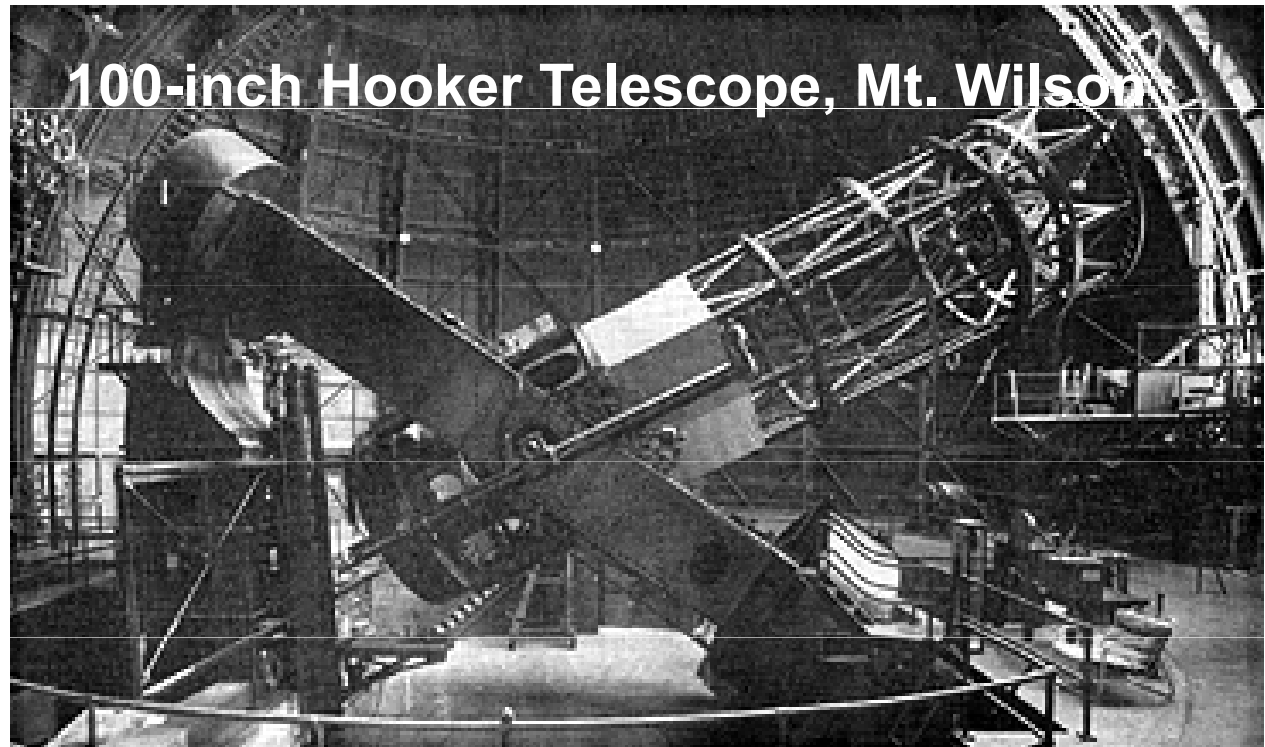
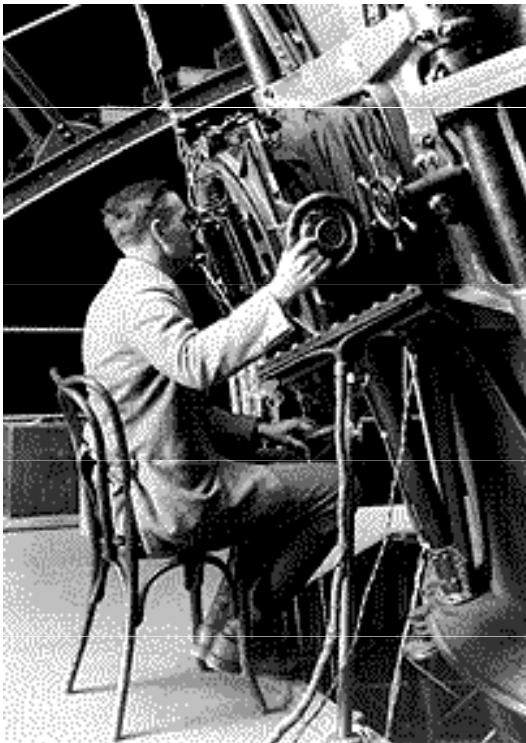


Hale Observatories, courtesy ADP



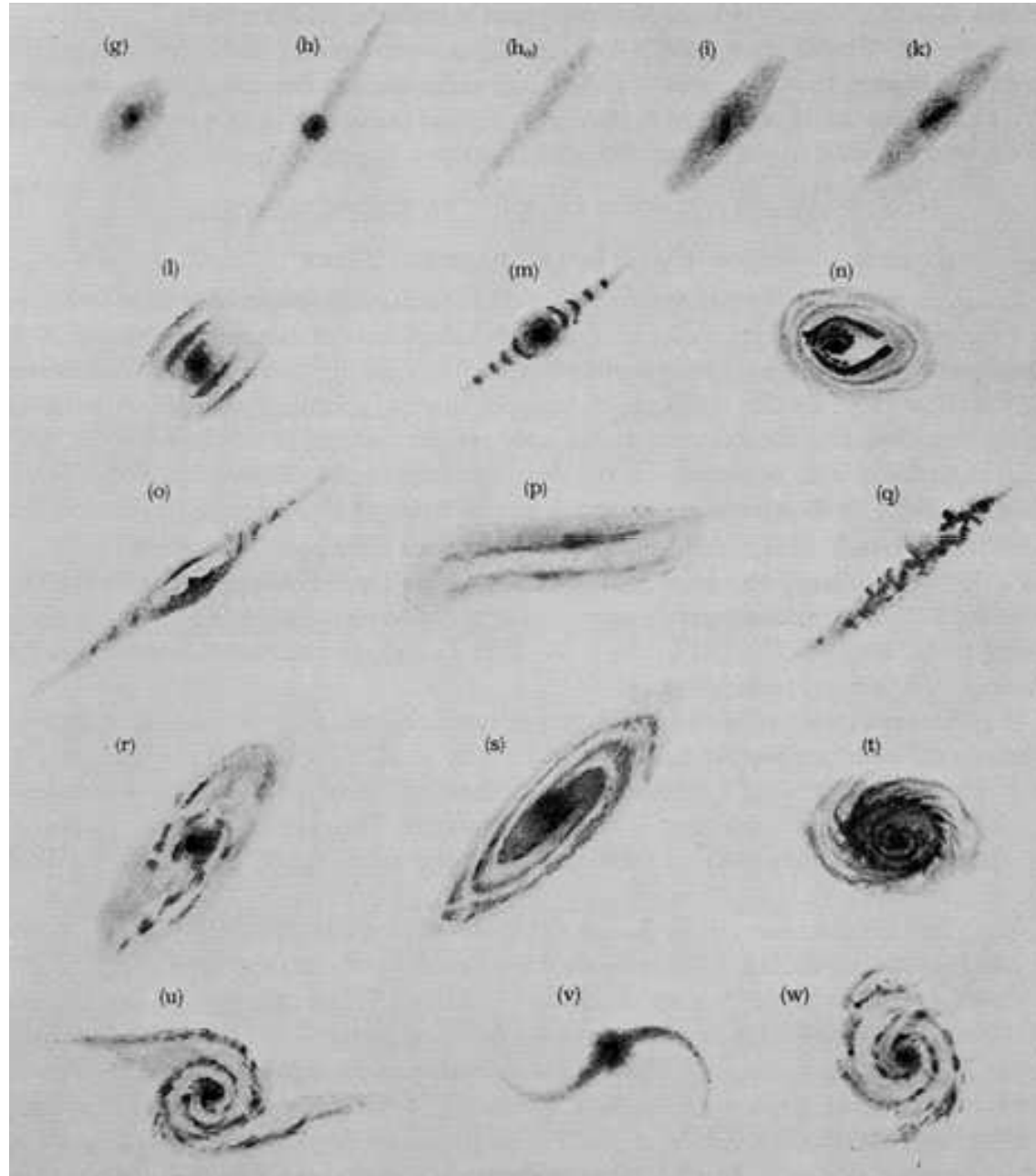
Hubbleův výzkumu galaxií

- a. Vytvoření klasifikace galaxií
- b. Jednotlivé typy hvězd – cefeidy, novy
definitivní rozlišení vnějších galaxií
- c. Hubbleův zákon



Výzkum mlhovin jejich klasifikace Max

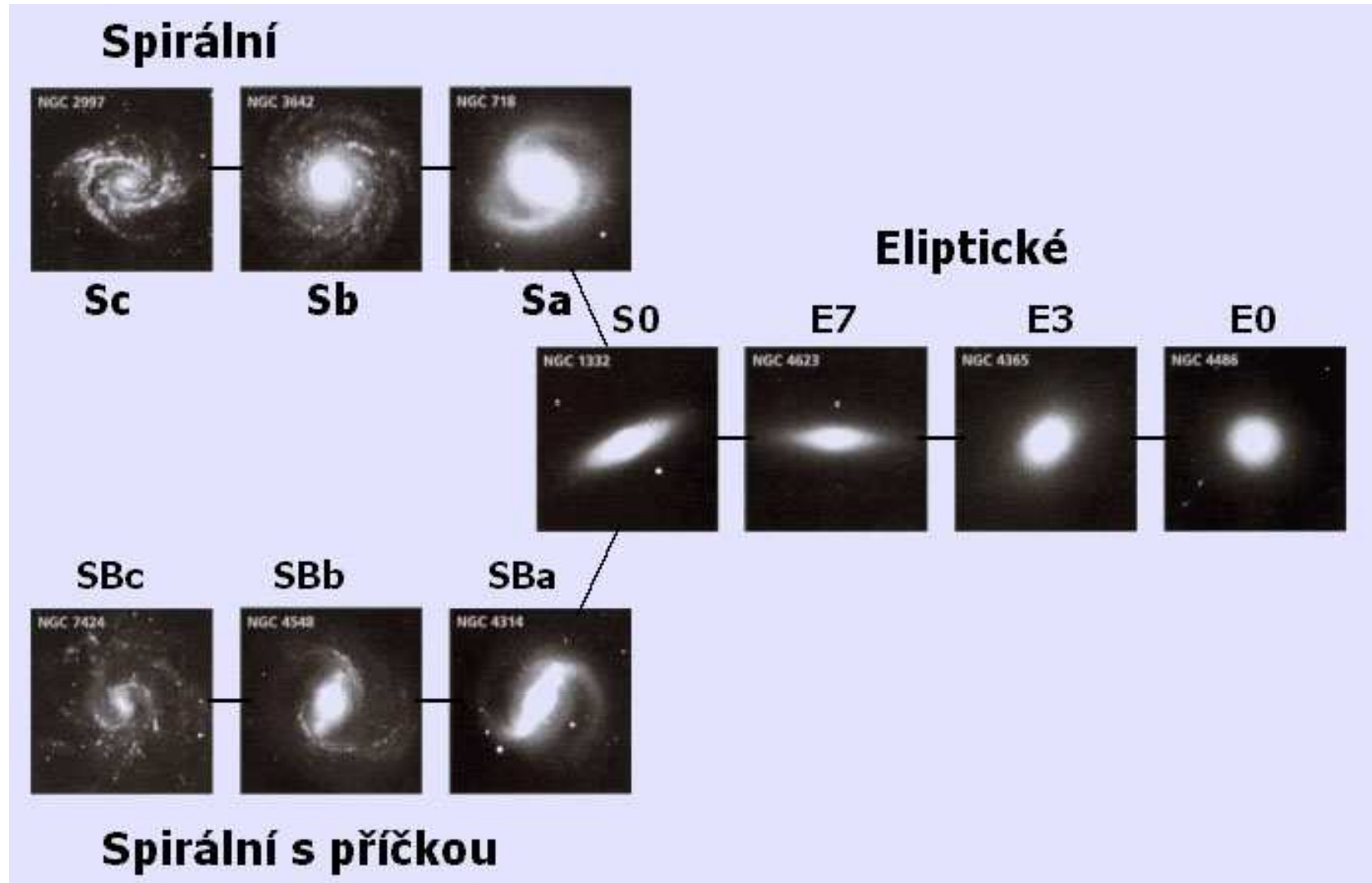
Wolf (1863 – 1932) r. 1908



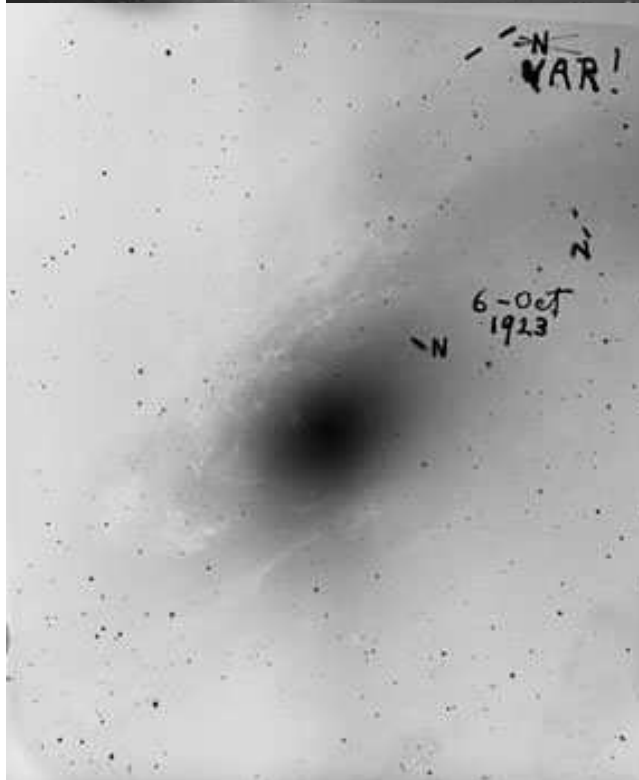
Hubbleova klasifikace galaxií r. 1936

The

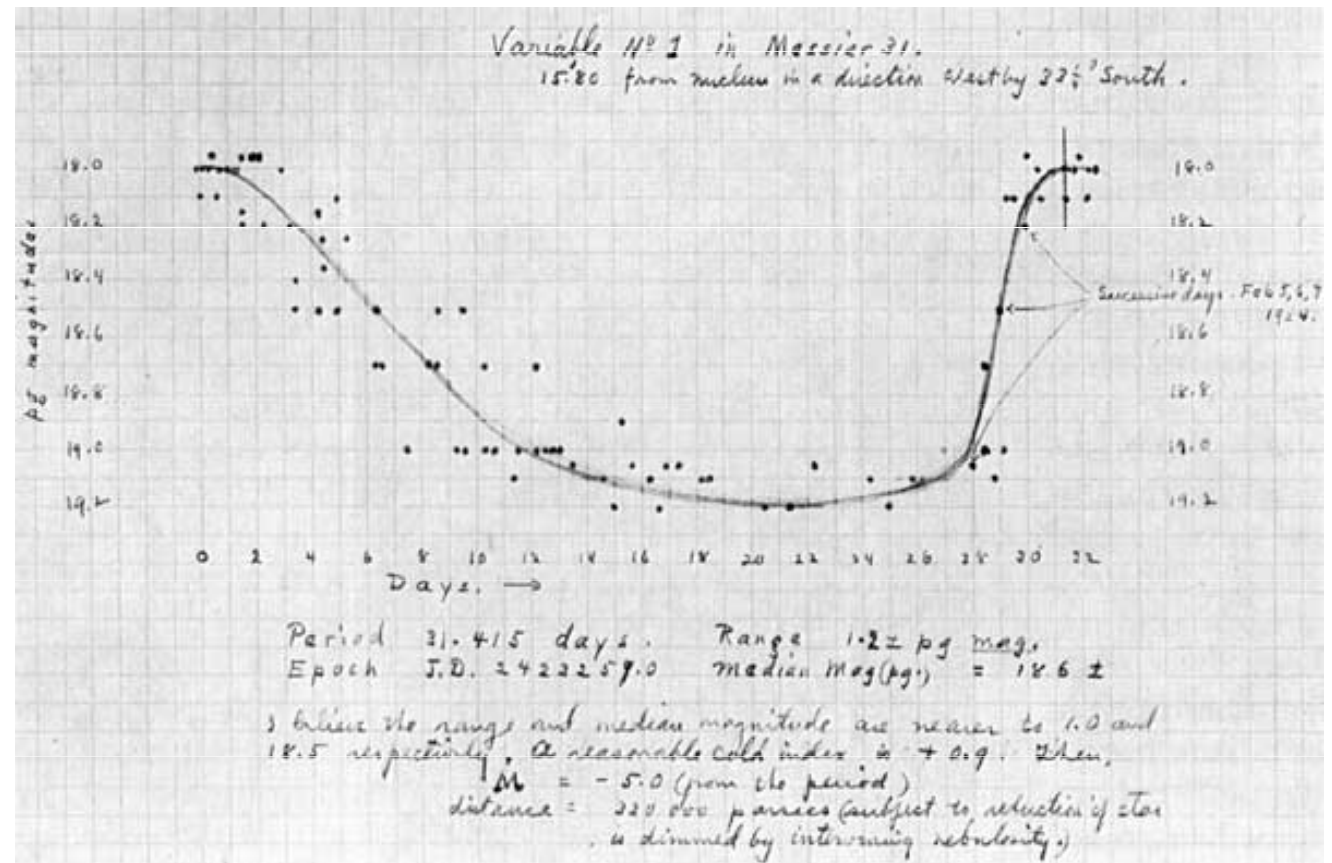
Realm of the Nebulae



Hubble objevil v říjnu 1923 klasickou cefeidu v galaxii M 31 → určil její vzdálenost



10. září 1923 úplné zatmění v Kalifornii, ♥ seznámení s Grace Burke, $P = 31,415$ dne



Objev cefeid – stanovení vzdálenosti

V dopise v únoru 1924 rivalovi H. Shapleymu uvádí: „*Bude pro Vás zajímavé slyšet, že jsem objevil cefeidu v mlhovině Andromedy (M 31). V této sezóně jsem pozoroval mlhovinu tak často, jak to dovolovalo počasí a za posledních pět měsíců jsem objevil devět nov a dvě proměnné hvězdy...`*”

- světelná křivka cefeidy

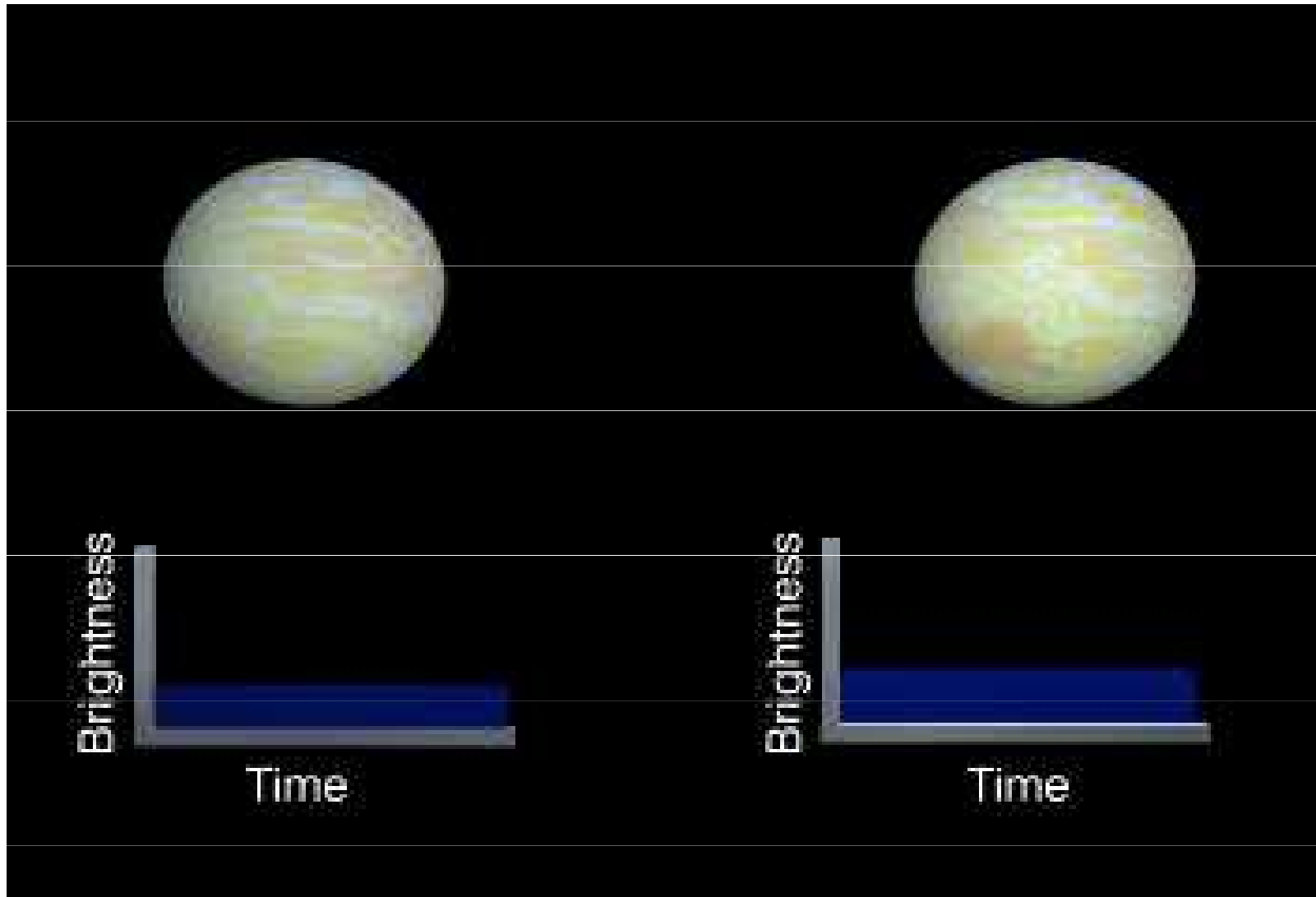
perioda pulsace P + pozorovaná hvězdnou velikost m =
vzdálenost

- galaxie M 31 300 kpc

$$M = a + b \log P \quad , \quad m - M = 5 \log r - 5$$

- spirální mlhovina - hvězdná soustava nacházející se mimo naši Galaxii

Cefeidy



$$M = a + b \log P$$

Mount Wilson E. Hubble:

ApJ, **56** (1922), p.162 - 199,

Contr. Mount Wilson Observ.,241,(1922), p.1 - 38

Obecný výzkum difúzních galaktických mlhovin

A GENERAL STUDY OF DIFFUSE GALACTIC NEBULAE¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

Suggested classification of nebulae.—Since the time of the Herschels, photography and spectroscopy have revolutionized the study of nebulae. The classification here suggested is based upon the fundamental differences between galactic and non-galactic nebulae. Galactic nebulae are subdivided into planetary and diffuse (luminous and dark), and non-galactic into spiral, elongated (spindle and ovate), globular, and irregular. The characteristics of each are discussed. The belief expressed by Curtis that all non-galactic nebulae are spirals is not justified by the facts.

Distribution of diffuse nebulae.—As shown in Figure 1 these nebulae are concentrated along two belts. One is the Milky Way and the other is approximately the belt of bright helium stars which defines the local cluster. Very few seem to occur in the vast regions between the Milky Way clouds and the local cluster.

Výzkum mlhovin

The classification proposed for general use, together with typical objects for each class, is as follows:

	Examples
I. Galactic nebulae	
1. Planetary	N.G.C. 7662
2. Diffuse	
a) Luminous	N.G.C. 1976
b) Dark	Barnard 86
II. Non-galactic nebulae	
1. Spiral	M 101 (N.G.C. 5457, 8)
2. Elongated	
a) Spindle	HV 24 (N.G.C. 4565)
b) Ovate	M 59 (N.G.C. 4621)
3. Globular	M 87 (N.G.C. 4486)
4. Irregular	N.G.C. 2366

rozdělení mlhovin – galaktické a mimogalaktické

- a) galaktických mlhovin spojených s Mléčnou dráhou
- b) mlhovin nacházejících se ve vysokých šířkách

Výzkum mlhovin - Evropa

K. W. Wirtz: Astr.Nach. 222, (1924), 21

De Sitterova kosmologie a radiální pohyby spirálních mlhovin

De Sitters Kosmologie und die Radialbewegungen der Spiralnebel. Von C. Wirtz.

Die Welt *de Sitters* ist eine sphärische Raum-Zeit-Welt, ein vierdimensionales Kontinuum aus Raum und imaginärer Zeit, das die Oberfläche einer Kugel in fünf Dimensionen bildet. *De Sitters* Weltraum ist masseleer, alle Masse fortgesetzt an eine der Beobachtung nicht zugängliche Stelle des Raumes, in einen Massenhorizont oder in einen Ring peripherischer Materie, notwendig, um die Leere innerhalb aufrecht zu erhalten. *Einsteins* ein Höchstmaß an Materie enthaltende und *de Sitters* Welt bilden die beiden Grenzfälle,

zwischen die die wirkliche Welt sich einordnet. *W. de Sitter*, MN 78.3, 1918; *A. S. Eddington*, Math. theory of relativity, Cambridge 1923. Chapt. III, V; vgl. ferner die anschauliche graphische Darstellung der *de Sitters*chen Welt bei *H. Weyl*, Naturwiss. 12 (1924), p. 201.

In *de Sitters* Welt, System B, tritt nun ein Phänomen ein, das der astronomischen Beobachtung zugänglich ist. Mit wachsendem Abstand vom Koordinatenursprung verlaufen die natürlichen Erscheinungen immer langsamer, immer lang-

2*

Carl Wilhelm Wirtz 1876 – 1939

neznal vzdálenosti, předpokládal jejich stejné velikosti
slabší mlhoviny s menšími úhlovými rozměry se
vyznačují většími radiálními rychlostmi

Výzkum mlhovin v Evropě

K. Lundmark: MNRAS **85**, (1925), 865 Pohyby a vzdálenosti spirálních mlhovin.

The Motions and the Distances of Spiral Nebulæ.
By Knut Lundmark, Ph.D. (Plates 18, 19.)

At present there are several different ways in which the distances of the spiral nebulæ can be estimated. The different methods to be used are properly divided into a direct and an indirect group. The former includes the rather few methods where no assumption is made concerning the physical nature of the spiral nebulæ. The latter embraces the many different methods where some assumption is made, for instance, that the spirals are agglomerations of stars, replicas of our stellar system, masses of gases or dust, or that individual objects observed in the spirals, such as novæ, cepheids, ordinary stars, and gaseous or dark nebulæ have, on the average, the same properties as the corresponding objects in the stellar system.

K. Lundmark 1889 – 1958

čím větší vzdálenosti mlhovin, tím menší jejich úhlový průměr



Vlastnosti cefeid

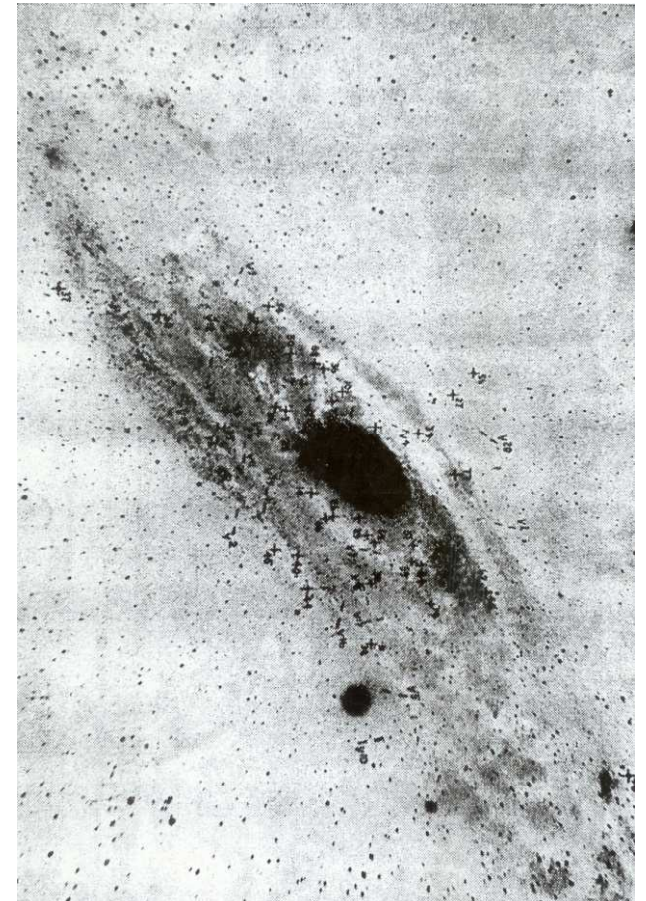
- souvisí s mlhovinami
- neexistuje výrazná absorpce světla
- jsou stejné v celém vesmíru

k 1.1.1925 Hubble: „*vnější části mlhovin lze rozložit na jednotlivé hvězdy*“

M 31 36 cefeid, 46 nov

M 33 47 cefeid

získáno \cong 200 fotografických
desek mlhovin



Mount Wilson – E. P. Hubble

ApJ 62, (1925), p.409 - 433

NGC 6822 vzdálená hvězdná soustava

N.G.C. 6822, A REMOTE STELLAR SYSTEM¹

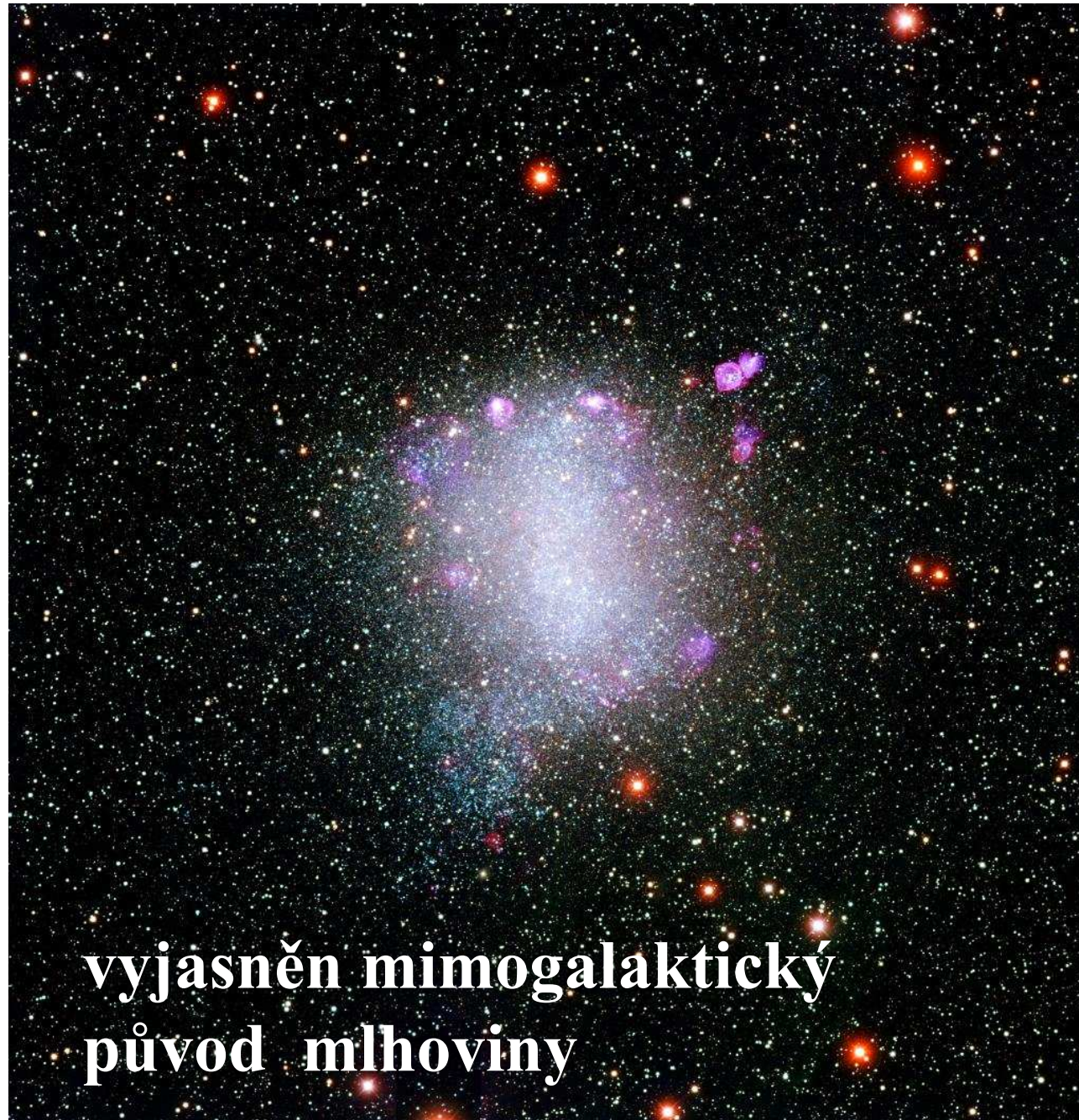
BY EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

A study of N.G.C. 6822.—The object is a very faint cluster of stars and nebulae, about $20' \times 10'$, resembling the Magellanic Clouds. Detailed investigations confirm the similarity and show that it extends to many structural features of these systems. Familiar relations such as those connecting periods and luminosities of Cepheids, luminosities of brightest stars involved in diffuse nebulae, and frequencies of the most luminous stars in the systems are consistent when applied to N.G.C. 6822, the first object definitely assigned to a region outside the galactic system.

Variable stars.—Eleven of the fifteen variables found in the cluster are Cepheids. A system of photographic magnitudes has been established from comparisons with the two nearest Selected Areas; and periods, light-curves, and magnitudes have been determined for the Cepheids. The periods range from 12 to 64 days and the magnitudes at maximum, from 17.45 to 19.05. The period-luminosity relation is conspicuous, and a comparison with Shapley's general curve in *Harvard Circular*, No. 280, indicates a distance for N.G.C. 6822 of 214,000 parsecs. $m - M = 21.65$.

galaxie NGC 6822



**vyjasněn mimogalaktický
původ mlhoviny**

Mount Wilson – E. P. Hubble

ApJ 63, (1926), p.236 - 274

Spirální mlhovina – hvězdná soustava M 33

A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM MESSIER 33^r

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

The spiral nebula Messier 33.—This object is the fainter of the two naked-eye spirals. Its great angular diameter and high degree of resolution, suggesting that it is one of the nearest objects of its kind, offer exceptional opportunities for detailed investigation.

Resolution.—Critical tests made with the 100-inch reflector, the highest resolving-power available, show no difference between the photographic images of the so-called condensations in Messier 33 and the images of ordinary galactic stars. Moreover, the application of ordinary methods of stellar research leads to consistent results, similar to those found in other systems of stars.

Variable stars.—Forty-two variable stars have been found in the spiral, in addition to the three previously known; thirty-five of these are typical Cepheids with periods ranging from thirteen to seventy days, and photographic magnitudes at maxima, from 18.0 to 19.1. Of the remaining ten variables, four are irregular, one is probably an eclipsing binary, while the types of five are as yet undetermined.

Mount Wilson – E. P. Hubble

Spirální mlhovina – hvězdná soustava M 33 ApJ

63, (1926), p.236 - 274

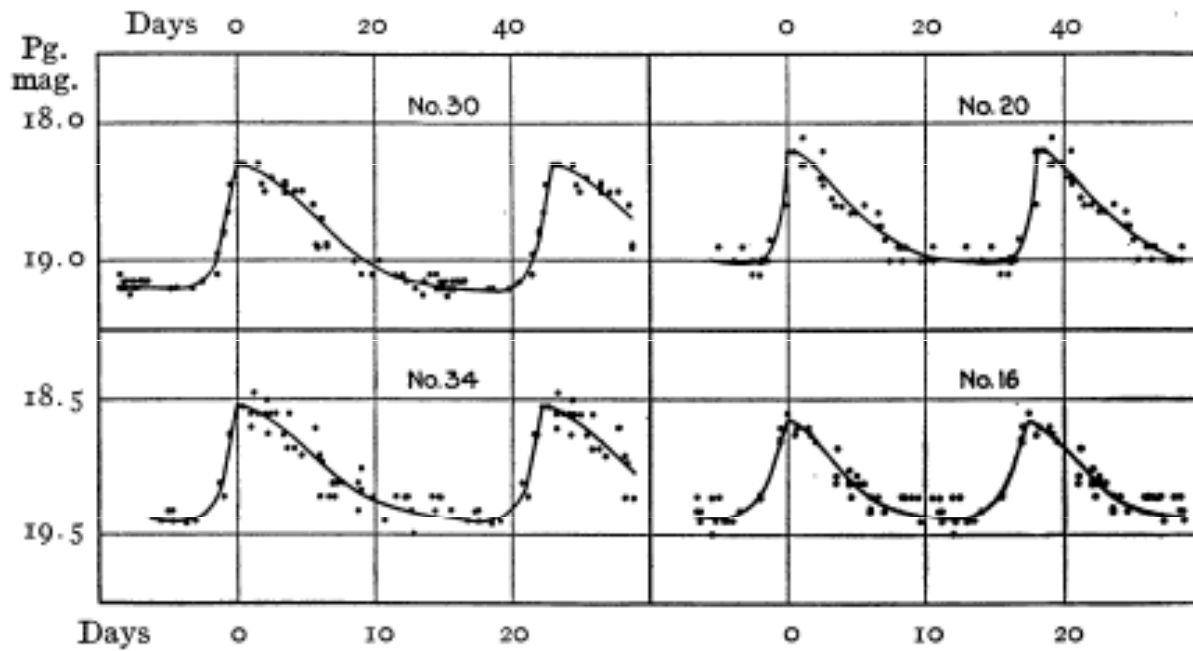


FIG. 1.—Mean light-curves for four Cepheids in Messier 33. The magnitudes are photographic.

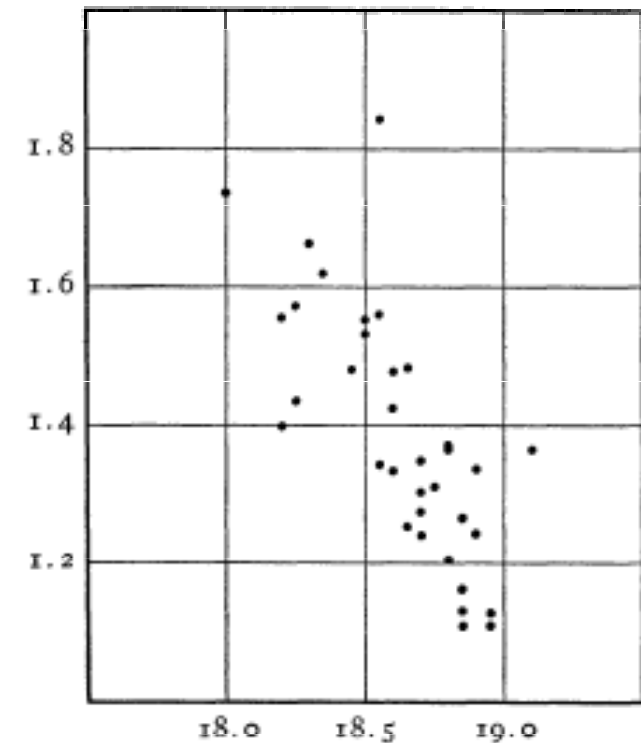


FIG. 2.—Period-luminosity relation among Cepheids in Messier 33. Photographic magnitudes at maximum (abscissae) are plotted against logarithms of period in days.

E. P. Hubble r. 1926

TABLE VII

ABSOLUTE DIMENSIONS OF MESSIER 33 AND THE MAGELLANIC CLOUDS

	MESSIER 33	MAGELLANIC CLOUDS	
		Large	Small
Distance*	263,000	34,500	31,600
Total magnitude	-15.1 pv.†	-16.5 pg.	-15.5 pg.
Diameter	4600	4300	2000
Volume	5×10^9	4.2×10^{10}	4.2×10^9
Density	9.3	10.0	8.5

* Distances and diameters are expressed in parsecs, volumes in cubic parsecs, and densities in absolute magnitudes per cubic parsec.

† The total magnitude of Messier 33 is expressed in visual absolute magnitudes, but, since the brighter stars in the spiral are white or blue, it is thought that the total photographic magnitude will not be very different.

Observatory Mount Wilson M. Humason:

Radial Velocities in Two Nebulae ASP 39 (1927), p. 317.

Radiální rychlosti dvou mlhovin

Two low dispersion spectrograms of the knot were obtained in May and June 1927, with a two-prism spectrograph having a camera of 3 inches focal length, at the Cassegrain focus of the 100-inch reflector. Exposures of 4 and 5 hours registered four emission lines but no trace of continuous spectrum. The lines, with their relative intensities, are as follows: $N_1(15)$, $N_2(3)$, $H\beta(3)$, $H\gamma(2)$. The radial velocities measured from the two plates are +189 km/sec for the shorter exposure and +229 km/sec for the longer. The weighted mean, +216 km/sec, is believed to represent the order of the velocity of the nebula as a whole.

Mount Wilson - M. L. Humason 1929

Proceedings National Academy of Sciences vol.
15, 1929, p. 167 - 168

Velká radiální rychlost NGC 7619

VOL. 15, 1929

ASTRONOMY: M. L. HUMASON

167

THE LARGE RADIAL VELOCITY OF N. G. C. 7619

BY MILTON L. HUMASON

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

radiální rychlost 3 779 km.s⁻¹

Mount Wilson - M. L. Humason 1929

Proceedings National Academy of Sciences vol.
15, 1929, p. 167 - 168

Velká radiální rychlost NGC 7619



During the past year two spectrograms of N. G. C. 7619 were obtained with Cassegrain spectrograph VI attached to the 100-inch telescope. This spectrograph has a 24-inch collimating lens, two prisms, and a 3-inch camera, and gives a dispersion of 183 \AA per millimeter at $\lambda 4500$. The exposure times for the spectrograms were 33^{h} and 45^{h} , respectively. The radial velocity from these plates has been measured by Miss MacCormack, of the computing division, and by myself, the weighted mean value being $+3779 \text{ km./sec}$. The velocity of this nebula is, therefore, twice as large as any hitherto observed, the highest previously known being that of N. G. C. 584, for which Slipher obtained $+1800 \text{ km./sec}$. Individual velocities from the two plates are $+3828 \text{ km./sec}$. for the shorter exposure, and $+3754 \text{ km./sec}$. for the longer, which is much the better of the two exposures and is given double weight.

E. P. Hubble:

Proceedings National
Academy of Sciences
vol. 15, 1929, p. 168 - 173

**Vztah mezi vzdáleností a
radiální rychlostí
extragalaktických mlhovin**



*A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

E. P. Hubble r. 1929

TABLE I
NEBULAE WHOSE DISTANCES HAVE BEEN ESTIMATED FROM STARS INVOLVED OR FROM
MEAN LUMINOSITIES IN A CLUSTER

OBJECT	m_s	r	s	m_t	M_t
S. Mag.	..	0.032	+ 170	1.5	-16.0
L. Mag.	..	0.034	+ 290	0.5	17.2
N. G. C. 6822	..	0.214	- 130	9.0	12.7
598	..	0.263	- 70	7.0	15.1
221	..	0.275	- 185	8.8	13.4
224	..	0.275	- 220	5.0	17.2
5457	17.0	0.45	+ 200	9.9	13.3
4736	17.3	0.5	+ 290	8.4	15.1
5194	17.3	0.5	+ 270	7.4	16.1
4449	17.8	0.63	+ 200	9.5	14.5
4214	18.3	0.8	+ 300	11.3	13.2
3031	18.5	0.9	- 30	8.3	16.4
3627	18.5	0.9	+ 650	9.1	15.7
4826	18.5	0.9	+ 150	9.0	15.7
5236	18.5	0.9	+ 500	10.4	14.4
1068	18.7	1.0	+ 920	9.1	15.9
5055	19.0	1.1	+ 450	9.6	15.6
7331	19.0	1.1	+ 500	10.4	14.8
4258	19.5	1.4	+ 500	8.7	17.0
4151	20.0	1.7	+ 960	12.0	14.2
4382	..	2.0	+ 500	10.0	16.5
4472	..	2.0	+ 850	8.8	17.7
4486	..	2.0	+ 800	9.7	16.8
4649	..	2.0	+1090	9.5	17.0

E. P. Hubble r. 1929

TABLE 2
NEBULAE WHOSE DISTANCES ARE ESTIMATED FROM RADIAL VELOCITIES

OBJECT	r	v_r	r	m_1	M_1
N. G. C. 278	+ 650	-110	1.52	12.0	-13.9
404	- 25	- 65	..	11.1	..
584	+1800	+ 75	3.45	10.9	16.8
936	+1300	+115	2.37	11.1	15.7
1023	+ 300	- 10	0.62	10.2	13.8
1700	+ 800	+220	1.16	12.5	12.8
2681	+ 700	- 10	1.42	10.7	15.0
2683	+ 400	+ 65	0.67	9.9	14.3
2841	+ 600	- 20	1.24	9.4	16.1
3034	+ 290	-105	0.79	9.0	15.5
3115	+ 600	+105	1.00	9.5	15.5
3368	+ 940	+ 70	1.74	10.0	16.2
3379	+ 810	+ 65	1.49	9.4	16.4
3489	+ 600	+ 50	1.10	11.2	14.0
3521	+ 730	+ 95	1.27	10.1	15.4
3623	+ 800	+ 35	1.53	9.9	16.0
4111	+ 800	- 95	1.79	10.1	16.1
4526	+ 580	- 20	1.20	11.1	14.3
4565	+1100	- 75	2.35	11.0	15.9
4594	+1140	+ 25	2.23	9.1	17.6
5005	+ 900	-130	2.06	11.1	15.5
5866	+ 650	-215	1.73	11.7	-14.5
Mean				10.5	-15.3

E. P. Hubble r. 1929

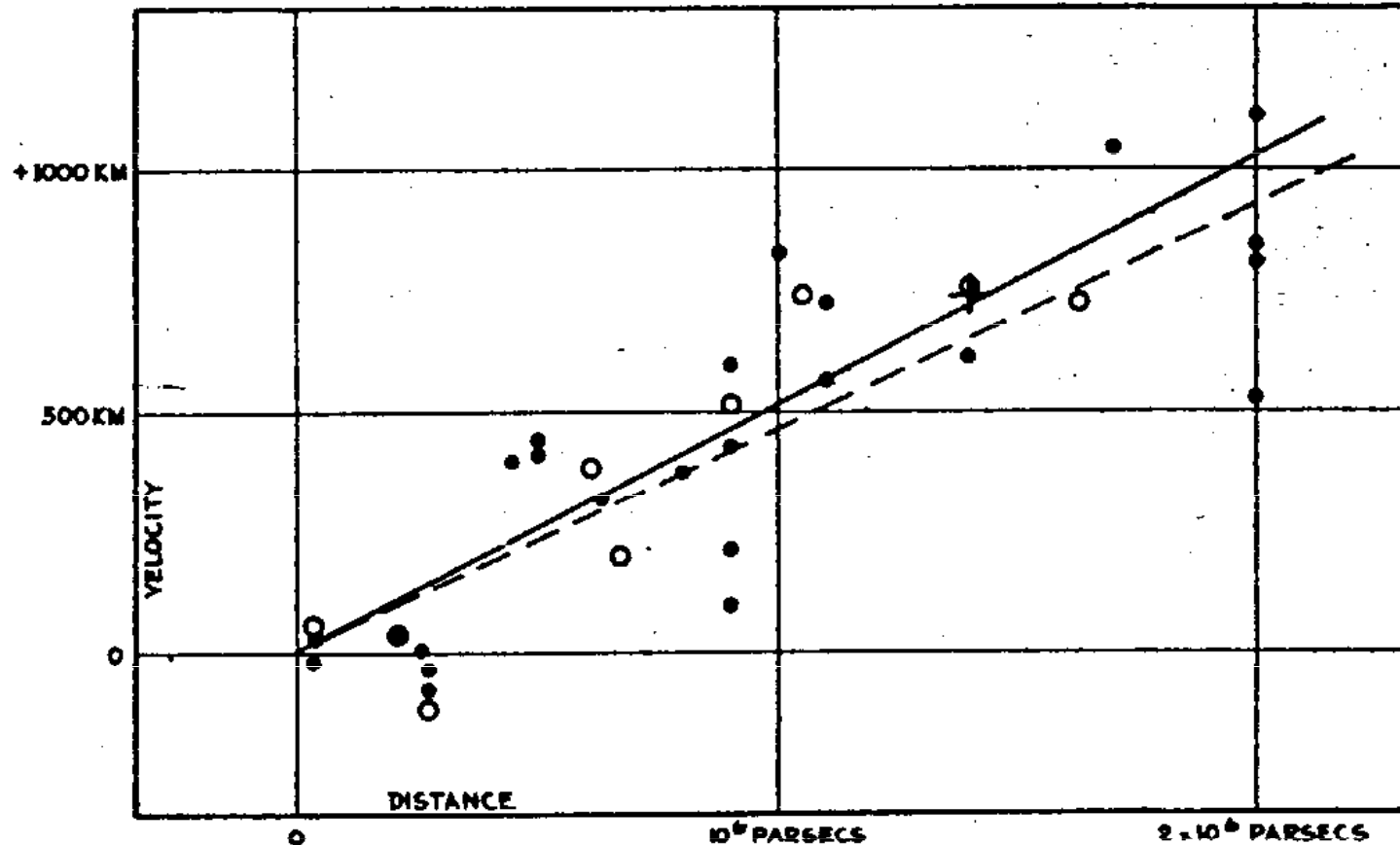


FIGURE 1

do 500 kpc – použity cefeidy, u větších vzdáleností
novy, modří obři, 90 % radiálních rychlostí stanovil
Slipher, zbytek Humason

rychlost NGC 7619 3 779 km.s⁻¹ v obr. není !

E. P. Hubble r. 1929

první představení problému, návrh dalšího výzkumu,

The results establish a roughly linear relation between velocities and distances among nebulae for which velocities have been previously published, and the relation appears to dominate the distribution of velocities. In order to investigate the matter on a much larger scale, Mr. Humason at Mount Wilson has initiated a program of determining velocities of the most distant nebulae that can be observed with confidence.

„Výsledky stanovují přibližně lineární vztah mezi rychlostmi a vzdálenostmi mlhovin, pro které byly dříve publikovány radiální rychlosti a vztah se jeví převládající v rozložení rychlostí. Aby se podařilo rozřešit problém pro mnohem větší vzdálenosti Humason na Mount Wilson zahájil program stanovení rychlostí nejvzdálenějších galaxií, jenž mohou být spolehlivě pozorovány.“

Hubbleův zákon r. 1929

označení

- jednotlivé galaxie - plná čára
- skupiny galaxií - přerušovaná čára
- + průměr pro 22 galaxií s nepřesně známou vzdáleností

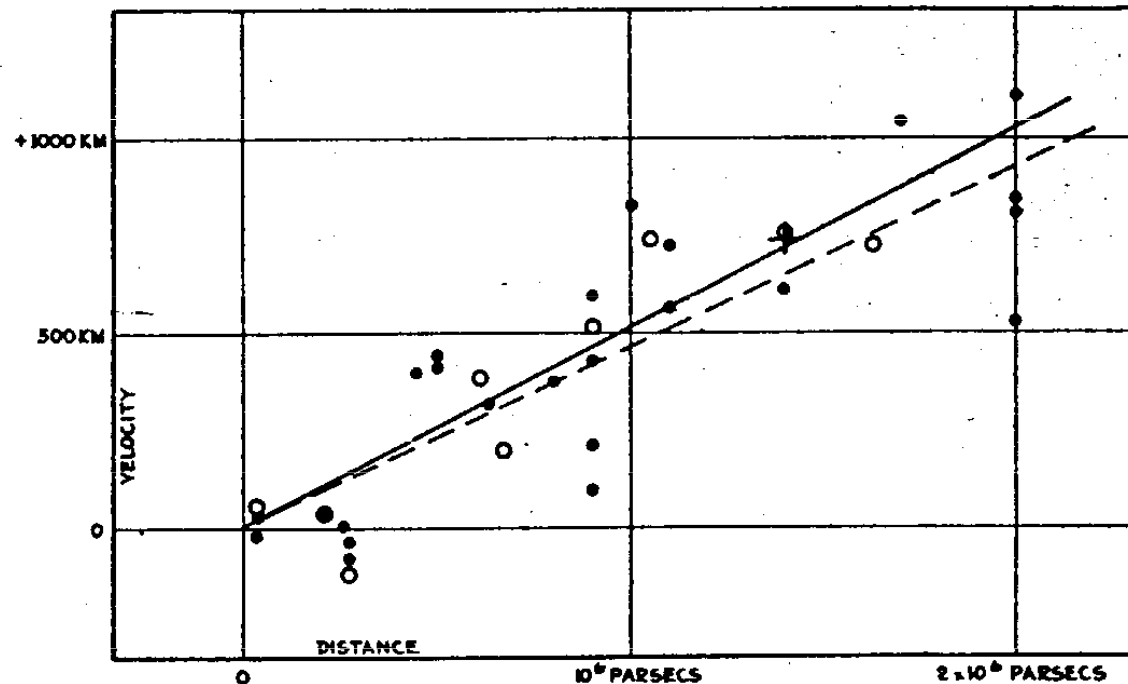


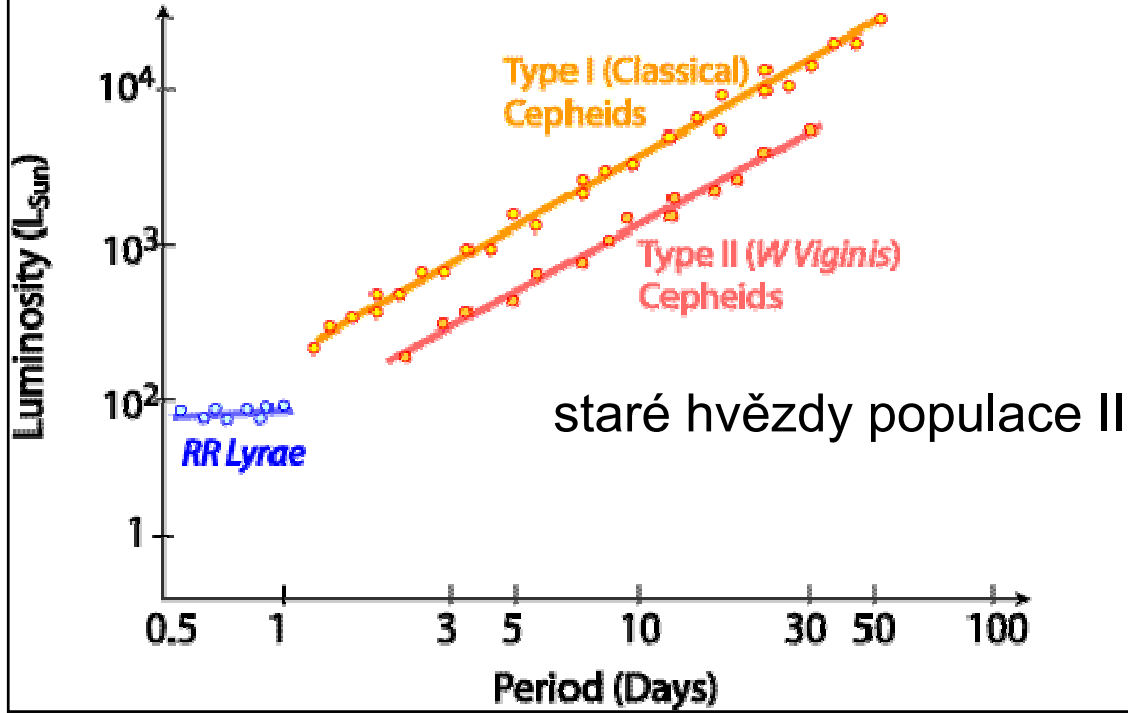
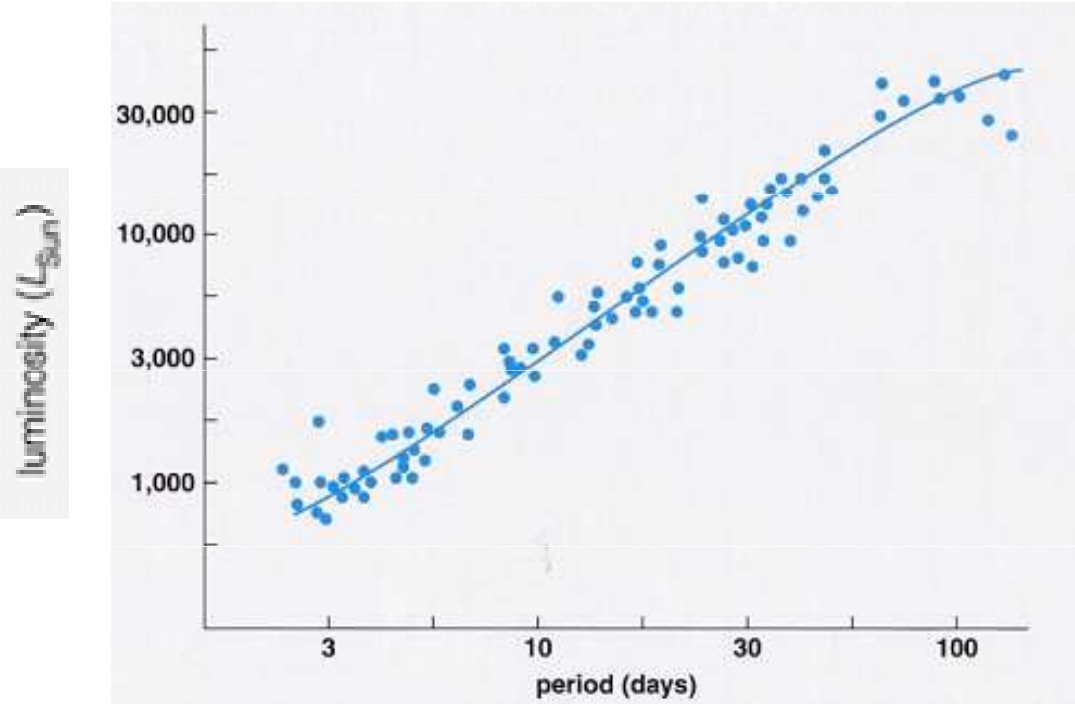
FIGURE 1

E. P. Hubble r. 1929

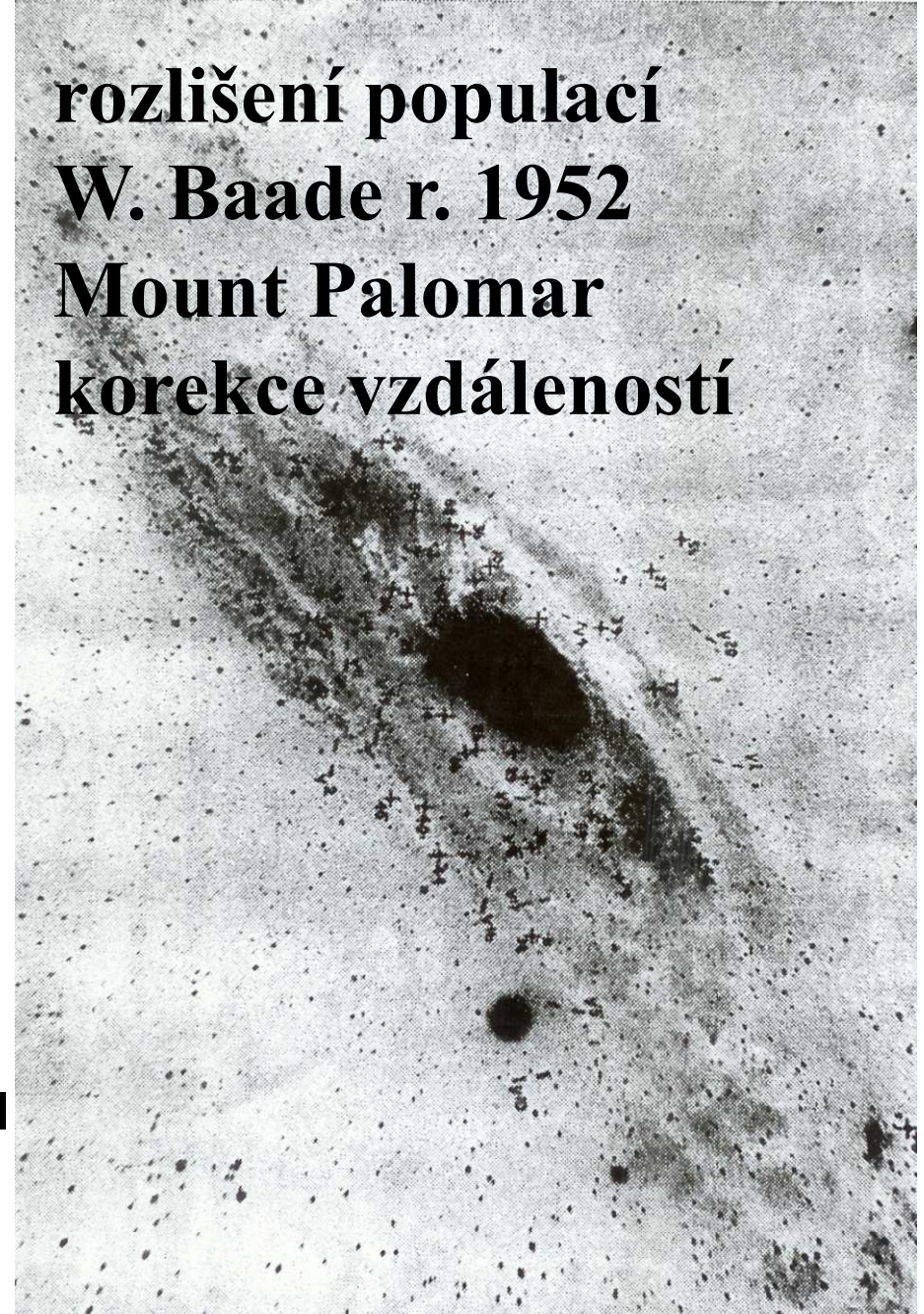
Nepřesnosti - chyby v práci:

1. Závislost perioda – zářivý výkon stanovena nepřesně, ve skutečnosti cefeidy byly mnohem jasnější, než se předpokládalo r. 1929, odlišné závislosti pro různé typy cefeid
2. Ve vzdálených galaxiích v některých případech provedena špatná identifikace objektů, záměna hvězdy – oblasti H II

cefeidy - galaxie M 31



rozlišení populací
W. Baade r. 1952
Mount Palomar
korekce vzdáleností



Wiliam de Sitter 1911 - 1960

holandský astronom, *O magnitudách, průměrech a vzdálenostech extragalaktických mlhovin a jejich pozorovaných radiálních rychlostech r. 1930*

BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES OF THE NETHERLANDS.

1930 May 26

Volume V.

No. 185.

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN.

On the magnitudes, diameters and distances of the extragalactic nebulae, and their apparent radial velocities, by *W. de Sitter*.

1. Lately several radial velocities of extragalactic nebulae have been published, all of which are large and positive. This makes the question of the distances of these objects of particular importance. For a few spirals, elliptical and irregular nebulae distances have been determined from the variable stars or novae contained in them, or from the brightest stars, or by other means, but for the great majority the distance can only be determined from the apparent total magnitude or the apparent diameter. If we suppose that the spreading in the absolute magnitudes and the linear diameters is small, and that there is no absorption of light in space, these two determinations must agree, and we must have $r_m = r_d$, the distances as determined from the magnitude and from the diameter being respectively:

$$(1) \quad \begin{aligned} \log r_m &= \frac{m}{5} - \frac{M}{5}, \\ \log r_d &= \log D - \log d, \end{aligned}$$

and consequently

$$(2) \quad H = \frac{m}{5} + \log d = \frac{M}{5} + \log D = \text{constant},$$

magnitudes (m) and the logarithms of the diameters ($\log d$) of a large number of nebulae.

2. The most serious difficulty in the derivation of the linear formulas (3) is the selection, which undoubtedly exists for the faint and small nebulae, making the average diameter of the faintest nebulae too large, and the average brightness of the smallest ones too great. The same thing occurs, in the opposite direction, and in a smaller degree, at the bright and large end of the curve. One remedy against this would be to reject these extreme objects, but this would considerably reduce the weight of the determination, so much so that in some cases it would become practically impossible. The way in which the material has been treated is the following. First the nebulae of each class were arranged in order of increasing brightness, and the means of the magnitude and the logarithm of the diameter of every ten (or another number) successive nebulae in this arrangement were formed. Then the nebulae were arranged in order of increasing diameter, and an equal number of means was again formed. Then the mean was taken of the corresponding means in the two arrangements, and through these

De Sitter r. 1930: O magnitudách, průměrech, a vzdálenostech extragalaktických mlhovin a jejich pozorovaných radiálních rychlostech

BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES
OF THE NETHERLANDS.

1930 May 26

Volume V.

No. 185.

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN.

On the magnitudes, diameters and distances of the extragalactic nebulae, and their apparent radial velocities, by *W. de Sitter*.

1. Lately several radial velocities of extragalactic nebulae have been published, all of which are large and positive. This makes the question of the distances of these objects of particular importance. For a few spirals, elliptical and irregular nebulae distances have been determined from the variable stars or novae contained in them, or from the brightest stars, or by other means, but for the great majority the distance

magnitudes (m_r) and the logarithms of the diameters ($\log d$) of a large number of nebulae.

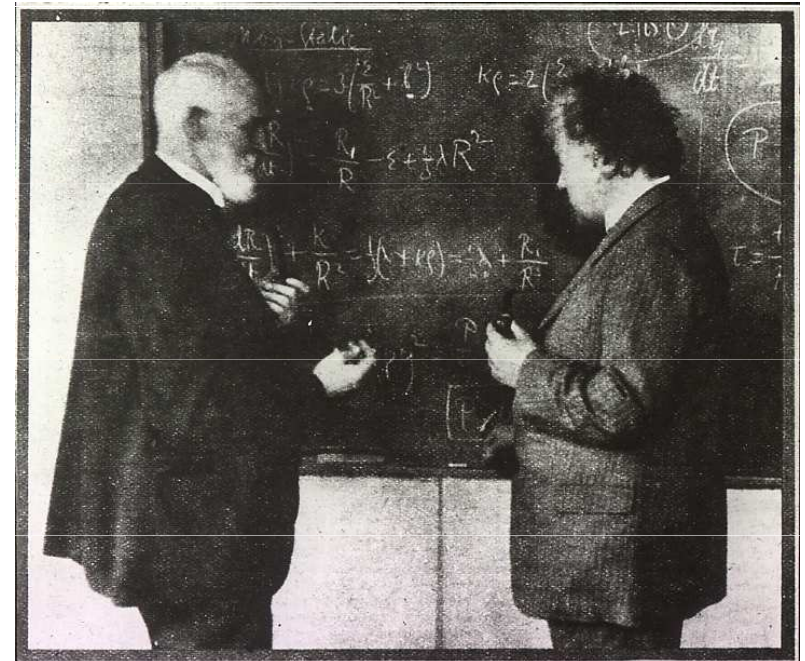
2. The most serious difficulty in the derivation of the linear formulas (3) is the selection, which undoubtedly exists for the faint and small nebulae, making the average diameter of the faintest nebulae too large, and the average brightness of the smallest ones too

teoretické důsledky rozpínání vesmíru

De Sitter x E. Hubble r. 1929

Hubble: „*Vždy jsem předpokládali, že když jsou opublikovány předběžné výsledky a je vytyčen další program výzkumu, právo prvního prověření nových údajů patří těm, kteří skutečně realizovali první výzkum...*“

Willem de Sitter 1872 - 1934



Hubble – Humason r. 1931

ApJ 74 (1931), p. 43 - 80

Vztah rychlost – vzdálenost pro extragalaktické mlhoviny

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION AMONG
EXTRA-GALACTIC NEBULAE²

BY EDWIN HUBBLE AND MILTON L. HUMASON

ABSTRACT

Methods of determining distances of extra-galactic nebulae are discussed, and the mean absolute magnitude is revised on the basis of (1) Shapley's revision of the zero-point of the period-luminosity curve for Cepheids, and (2) more extensive observations of stars involved in nebulae. The revised value is $M(\text{vis}) = -14.9$.

Hubble - vzdálenosti galaxií pomocí hvězd,

Humason - radiální rychlosti, indikátory vzdálenosti cefeidy + jasné hvězdy, radiální rychlost 46 mlhovin

Hubble - Humason r. 1931

TABLE IV
VELOCITIES AND MAGNITUDES

	r	v_1	v_2	m_{vis}^*	m_{pg}	Type	Diam.
Virgo cluster:	km/sec.						
N.G.C. 4102...	+ 1150	+ 20					
4374...	1050	30					
4382...	500	40					
4472...	850	20	+ 890	(12.5)			
4486...	800	30					
4526...	580	20					
4649...	1090	+ 40					
Pegasus:							
N.G.C. 7611...	3400						
7617...	3900						
7619...	3800	+ 90	3810	15.5			
7623...	3800						
7626...	3700						
Pisces:							
N.G.C. 380...	4400						
383...	4500	+ 60	4630	15.4			
384...	4500						
385...	4900						
Cancer:							
N.G.C. 2562...	5100						
2563...	4800	- 130	4820	16.0			
Perseus:							
N.G.C. 1270...	4800						
1273...	5800	0	5230	16.4			
1275...	5100						
1277...	5200						
Coma:							
N.G.C. 4853...	7600						
4860...	7900	+ 100	7500	17.0			
4865†...	5000						
4884...	6700						
Ursa Majoris:							
Baade 24.....	11700	+ 100	11800	18.0			
Leo:							
No. 1.....	19700	- 90	19600	19.0			
Isolated nebulae:							
N.G.C. 2859...	1500	- 50	1450	11.1		SBa	1.9
2950...	1500	+ 60	1560	11.6		SBa	1.4
3193...	1300	- 60	1240	12.1		E2	1.0
3227...	1150	- 60	1090	12.0		Sb	3.0
3610...	1850	+ 100	1950	11.8		E4	1.4
4051...	650	+ 90	740	11.9		Sb	4.0
6350...	3000	+ 250	3250	14.3		E2	0.4
6658...	4100	+ 270	4370	14.8		Sa	1.6
6661...	3900	+ 270	4170	14.0		Sa	1.6
6702...	2250	+ 280	2530	14.6		E2	0.6
6703...	2000	+ 280	2280	13.6		E0	0.9
6710...	5100	+ 280	5380	15.0		Sa	0.8
6824...	3200	+ 240	3440	14.0		Sb	1.6
7217...	1050	+ 200	1250	12.3		Sb	3.0
7242...	+ 5000	+ 200	+ 5200	15.5		E2	0.3

* Holetschek visual magnitudes.

† Possibly an isolated nebula superposed on the cluster. $m_{pg}=14.7\pm$. The type is E4; the diameter, 0'.13.

Hubble - Humason r. 1931

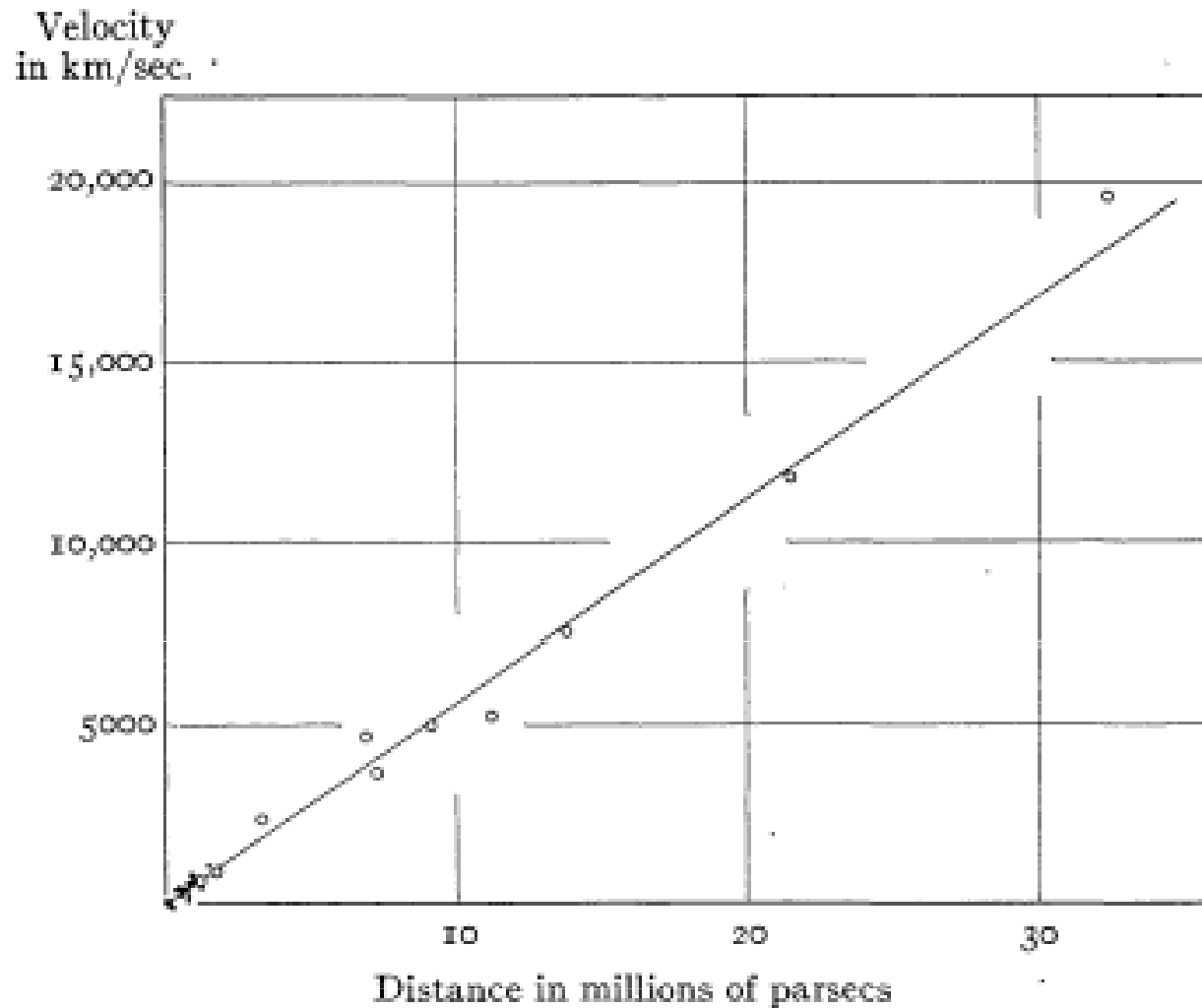
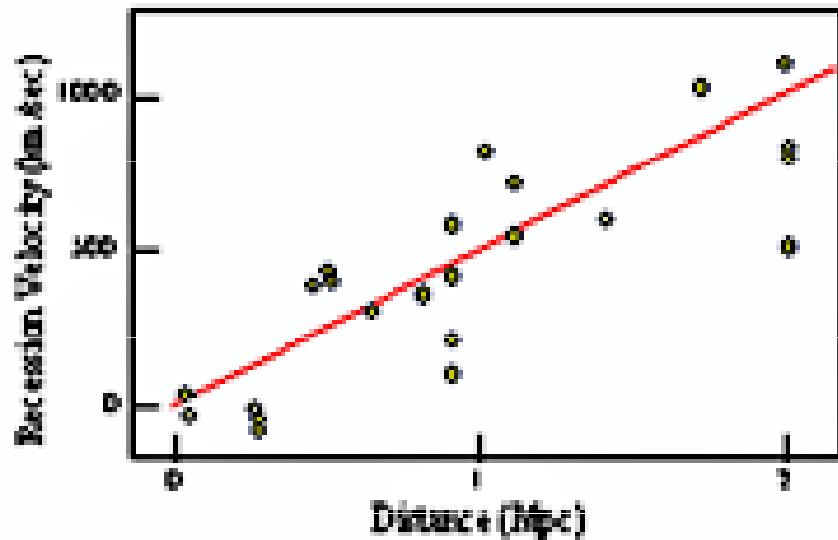


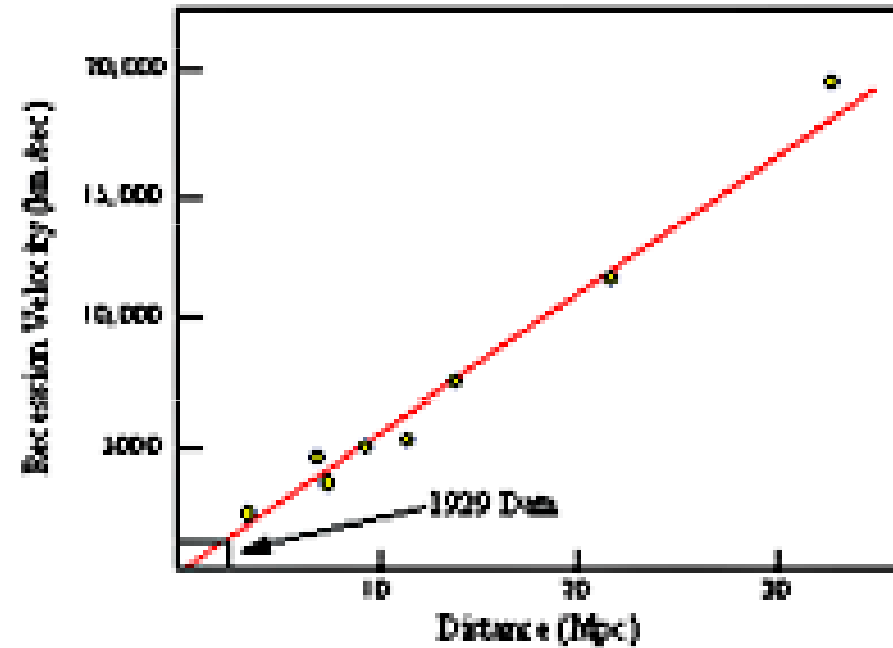
FIG. 5.—The velocity-distance relation. The circles represent mean values for clusters or groups of nebulae. The dots near the origin represent individual nebulae, which, together with the groups indicated by the lowest two circles, were used in the first formulation of the velocity-distance relation.

Srovnání diagramů r. 1929 - 1931

Hubble's Data (1929)



Hubble & Humason (1931)



při vzdálenosti 18krát větší než v r. 1929 lze závislost rychlost - vzdálenost považovat za obecnou charakteristikou pozorované oblasti prostoru,
 $H \cong 560 \text{ km.s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$

De Sitter – Einstein r. 1932

PROCEEDINGS
OF THE
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Volume 18

March 15, 1932

Number 3

*ON THE RELATION BETWEEN THE EXPANSION AND THE
MEAN DENSITY OF THE UNIVERSE*

BY A. EINSTEIN AND W. DE SITTER

Communicated by the Mount Wilson Observatory, January 25, 1932

In a recent note in the *Göttinger Nachrichten*, Dr. O. Heckmann has pointed out that the non-static solutions of the field equations of the general theory of relativity with constant density do not necessarily imply a positive curvature of three-dimensional space, but that this curvature may also be negative or zero.

Hubble: „*interpretace pozorovacích údajů náleží teoretikům...*“

Humason r. 1936 ApJ 83 (1936), p.10 – 23

**Pozorované radiální rychlosti
100 extragalaktických mlhovin**

THE APPARENT RADIAL VELOCITIES OF 100
EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

M. L. HUMASON

ABSTRACT

New velocities of 100 nebulae are given in Table I. With the exception of 6, they are all velocities of recession ranging from +50 km/sec, for a member of the Virgo Cluster, to +42,000 km/sec for a member of the Ursa Major Cluster No. 2.

Humason proměřil dalších 35 nových izolovaných mlhovin, nečlenů kup galaxií, celkem 100 galaxií

Humason r. 1936

TABLE I
APPARENT VELOCITIES OF 100 EXTRA-GALACTIC NEBULAE

NGC	1950		Po m	TYPE	VELOCITY	Sp.	REMARKS
	R.A.	Dec.					
7814....	0 ^h 0 ^m 7	+15° 51'	12.4	Sa	+ 1000::	G3	Group
68....	0 15.8	+20 48	.....	E	+ 5700	G3
69....	0 15.8	+20 46	.....	Sa	+ 6700	G0
71....	0 15.8	+20 47	.....	E	+ 6600	G3
72....	0 15.9	+20 46	.....	SBb	+ 7000	G7
Anon 1....	0 16.0	+20 46	Sa	+ 6800	G3	Group
80....	0 18.6	+22 5	.....	E	+ 5600	G5
83....	0 18.8	+22 9	.....	E	+ 6500	G3
157....	0 32.3	- 8 40	11.1	Sc	+ 1800	G4	
160....	0 33.4	+23 41	.....	Sa	+ 2600::	G8
* 247....	0 44.6	-21 1	10.7	Sc	- 15	Pd	Group
* 253....	0 45.1	-25 34	7.0	Sc	- 50	Pd	
* 379....	1 4.5	+32 15	.....	Sa	+ 5500	G6
628....	1 34.0	+15 32	11.2	Sc	+ 600:	G2	
681....	1 46.7	-10 40	12.9	S	+ 2100:	G5	
720....	1 50.6	-13 59	11.7	E5	+ 1800:	G4	Group
* 772....	1 56.6	+18 46	12.0	Sb	+ 2200	G4	
* 1084....	2 43.5	- 7 47	11.2	Sc	+ 1500	F5	
1087....	2 43.9	- 0 42	11.2	Sc	+ 1850	F0	
1332....	3 24.1	-21 31	11.4	Sa	+ 1400	G2	
1400....	3 37.2	-18 51	12.5	E1	+ 500	G5	Gem Cl.
1407....	3 37.9	-18 44	11.5	E0	+ 2000:	G8	
* IC 342....	3 41.9	+67 57	14.0	Sc	- 25	F8e	
Anon 2....	4 38.1	+ 4 10	16.0	Sa	+ 4600	G7	
Anon 3....	7 4.4	+35 9	17.0	E?	+24000::	G2	
Anon 4....	7 5.0	+35 4	16.8	E	+23000	G3	Gem Cl.
2403....	7 32.0	+65 43	10.2	Sc	+ 125	F8	
* 2655....	8 49.4	+78 25	11.6	Sa	+ 1350	G2e	
2775....	9 7.7	+ 7 15	11.5	Sa	+ 1100	G3	
2768....	9 7.8	+60 16	12.0	E6	+ 1400	G3	

Humason r. 1936

TABLE I—Continued

NGC	1950		Po m	TYPE	VELOCITY	Sp.	REMARKS
	R.A.	Dec.					
Anon 5.....	10 ^h 55 ^m 4	+57 ^o 3'	17.5	E	+19000::	G0	UMa Cl. No. 2
Anon 6.....	10 55.7	+57 1	17.9	E	+42000::	G2	
3486.....	10 57.8	+29 15	11.4	Sc	+ 1250::	G3	
3726.....	11 30.7	+47 19	11.7	Sc	+ 1150::	G0	UMa Cl. No. 1
▪ Anon 7.....	11 44.5	+50 1	15.9	E	+15400	G5	

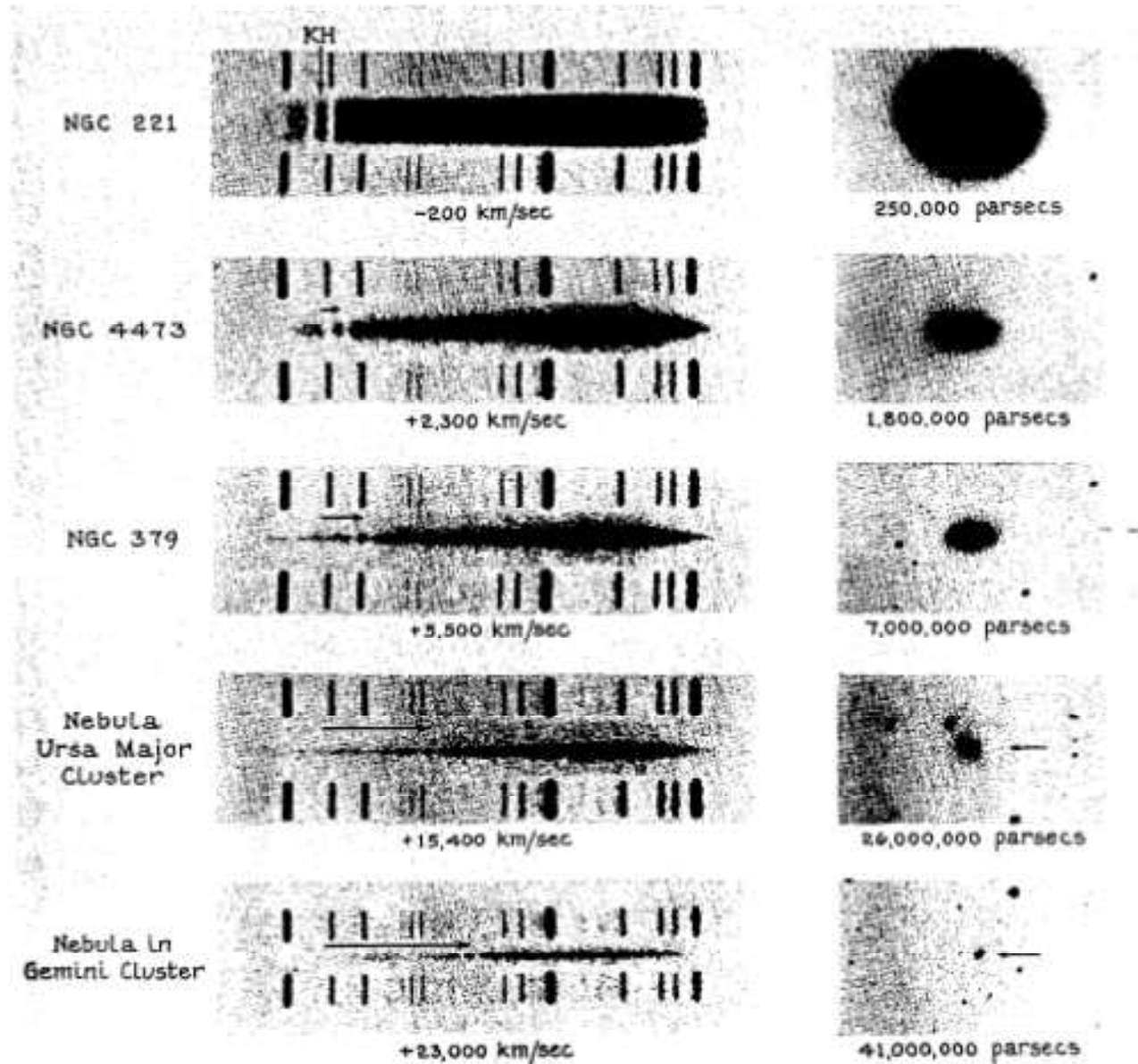
rekordní hodnota 42 000 km.s⁻¹ →

limitní možnost 100 palcového dalekohledu

Mount Wilson

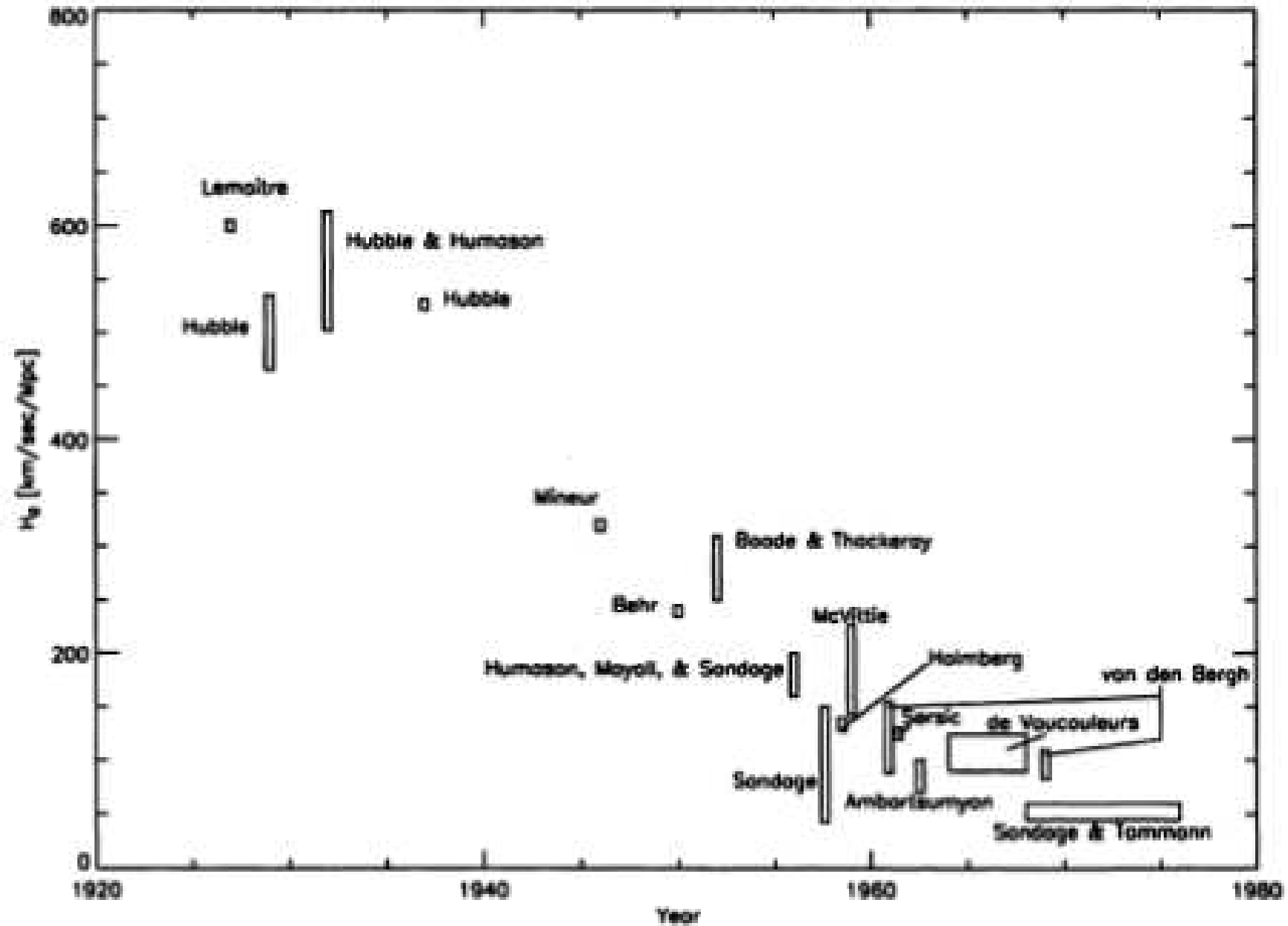
Humason r. 1936

PLATE III



RED-SHIFTS IN THE SPECTRA OF EXTRA-GALACTIC NEBULAE

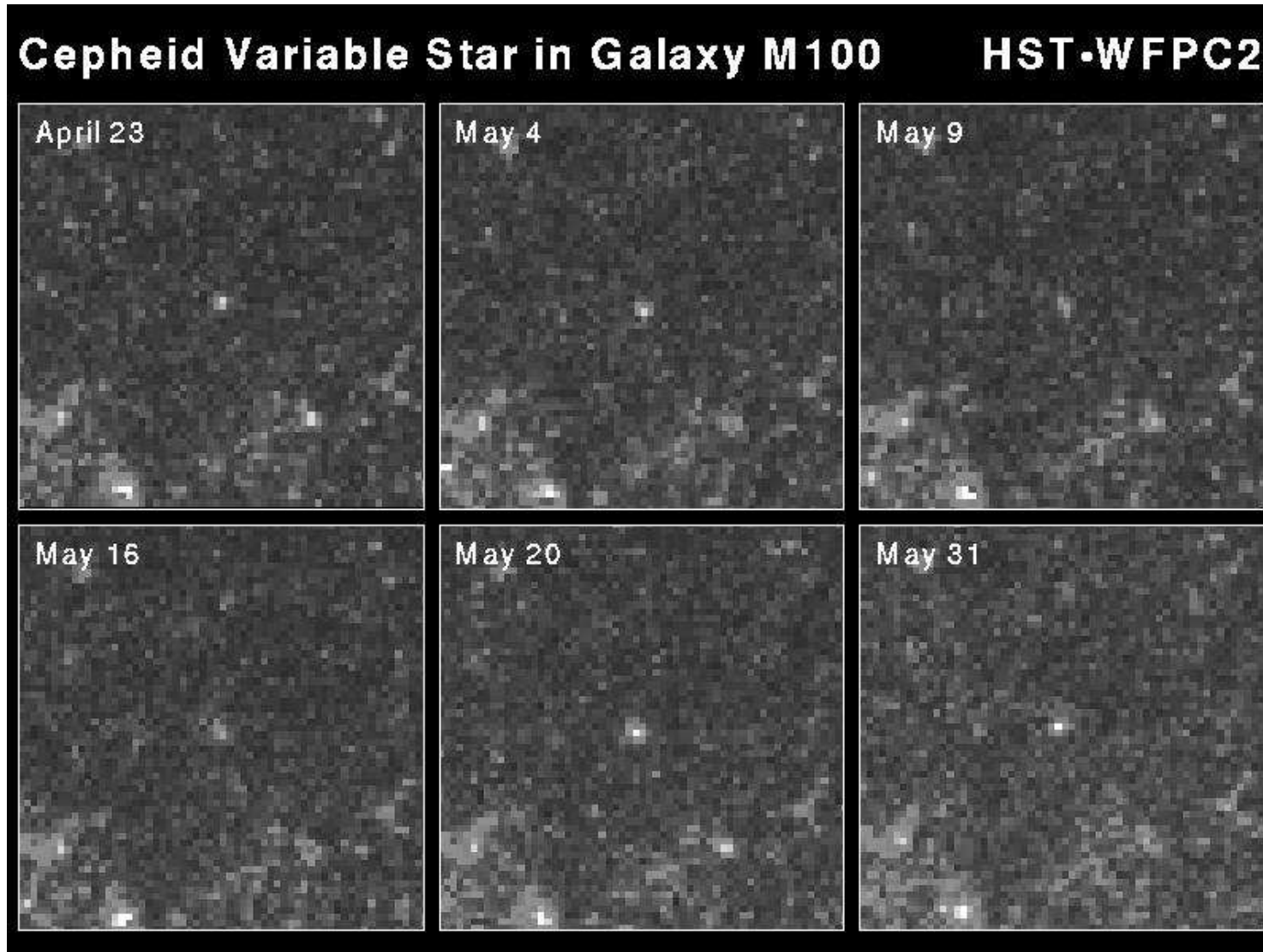
Hubbleova konstanta, upřesňování



Určování vzdáleností pomocí cefeid HST

$$M = a + b \log P$$

$$r = (17,1 \pm 1,8) \text{ Mpc}$$



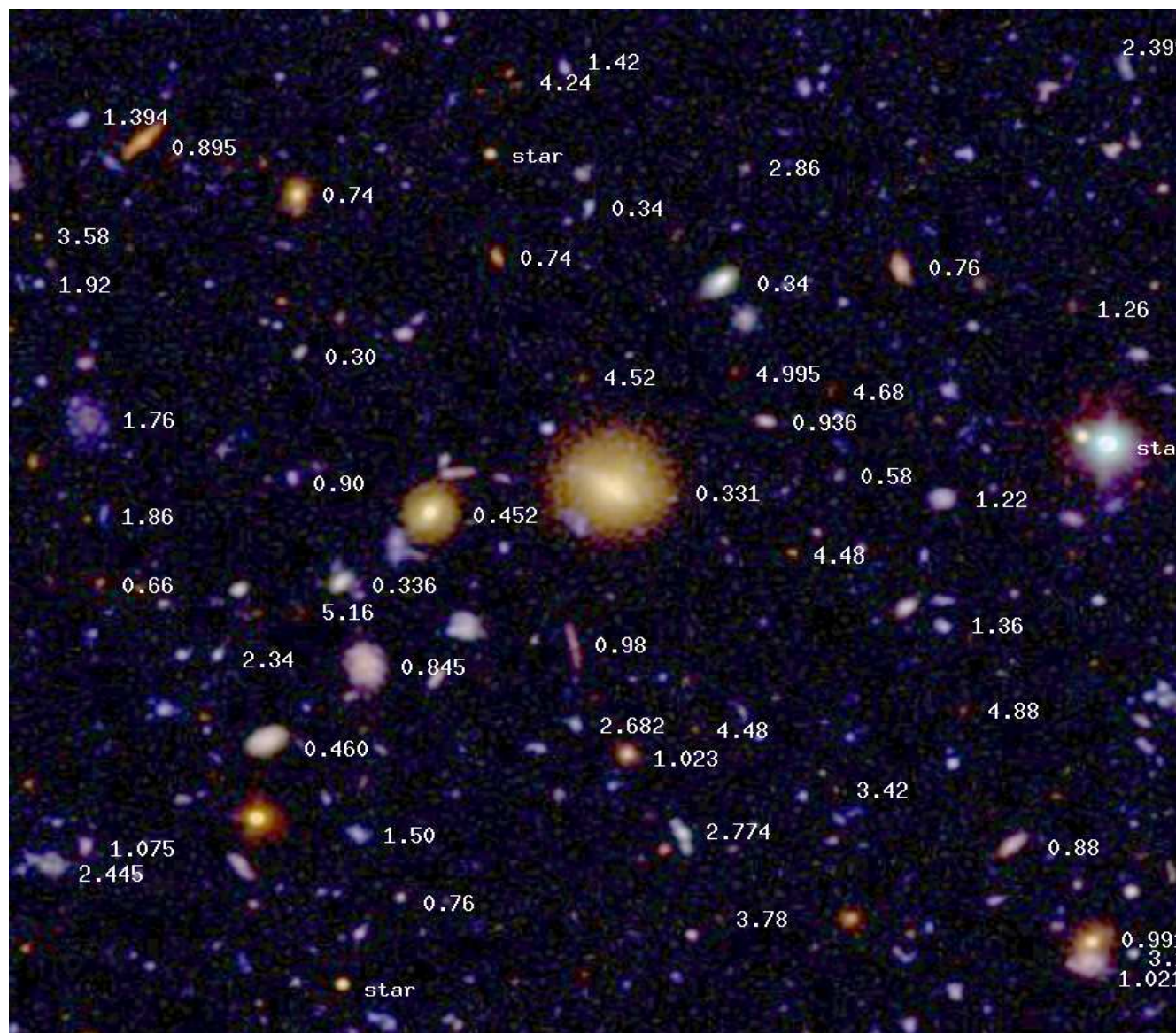
Hubbleovo vzdálené pole galaxií

Hubble Deep Field



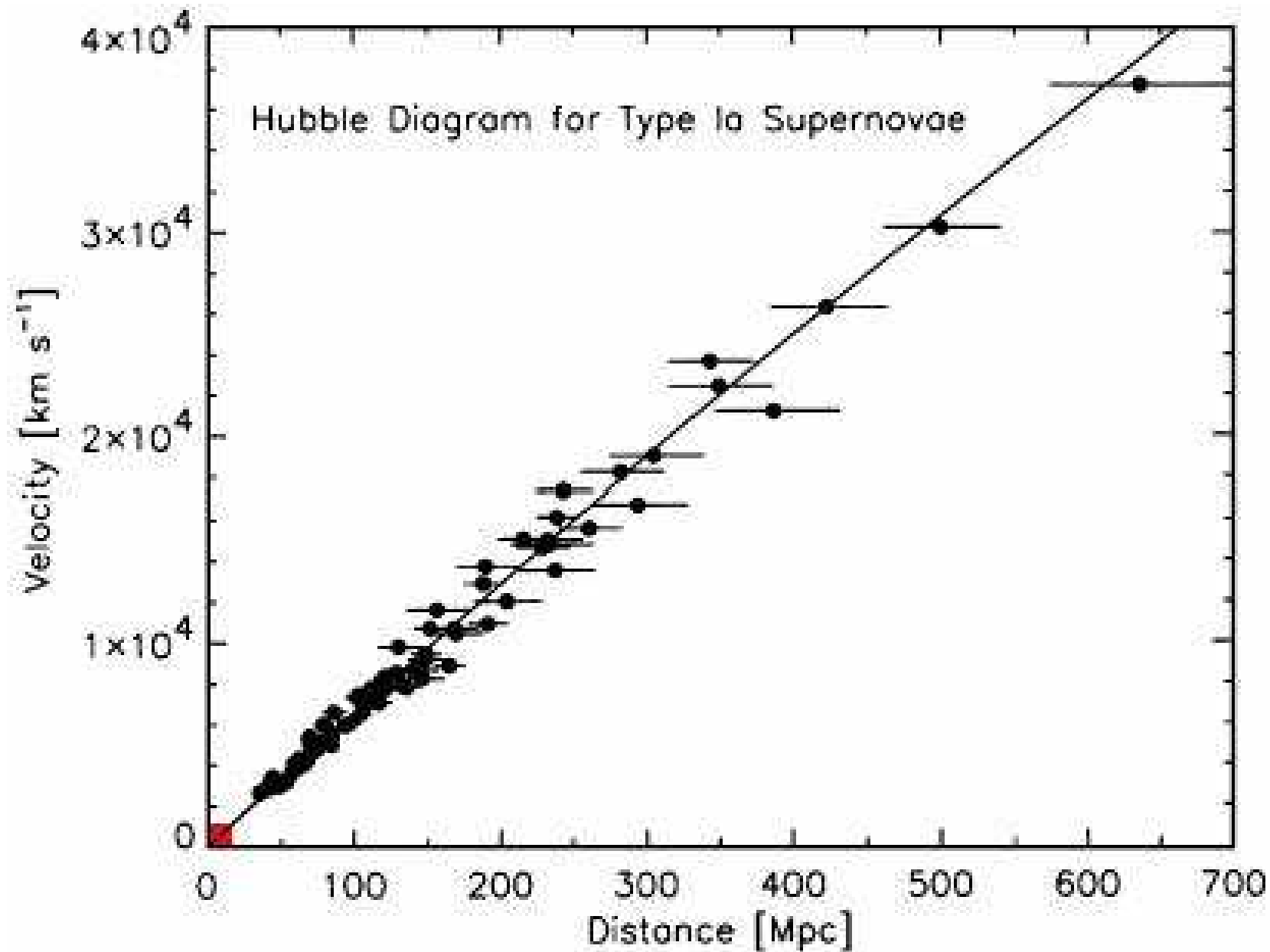
**Přes 800 expozičních snímků, v
čase více než 240 hodin**

Hubbleův zákon - určování vzdáleností ve vesmíru



<http://astronomy.swin.edu.au/~elenc/Calculators/redshift.php>

Původní Hubbleova závislost rychlost – vzdálenost v porovnání se současnou pro supernovy I a



Hubbleův zákon

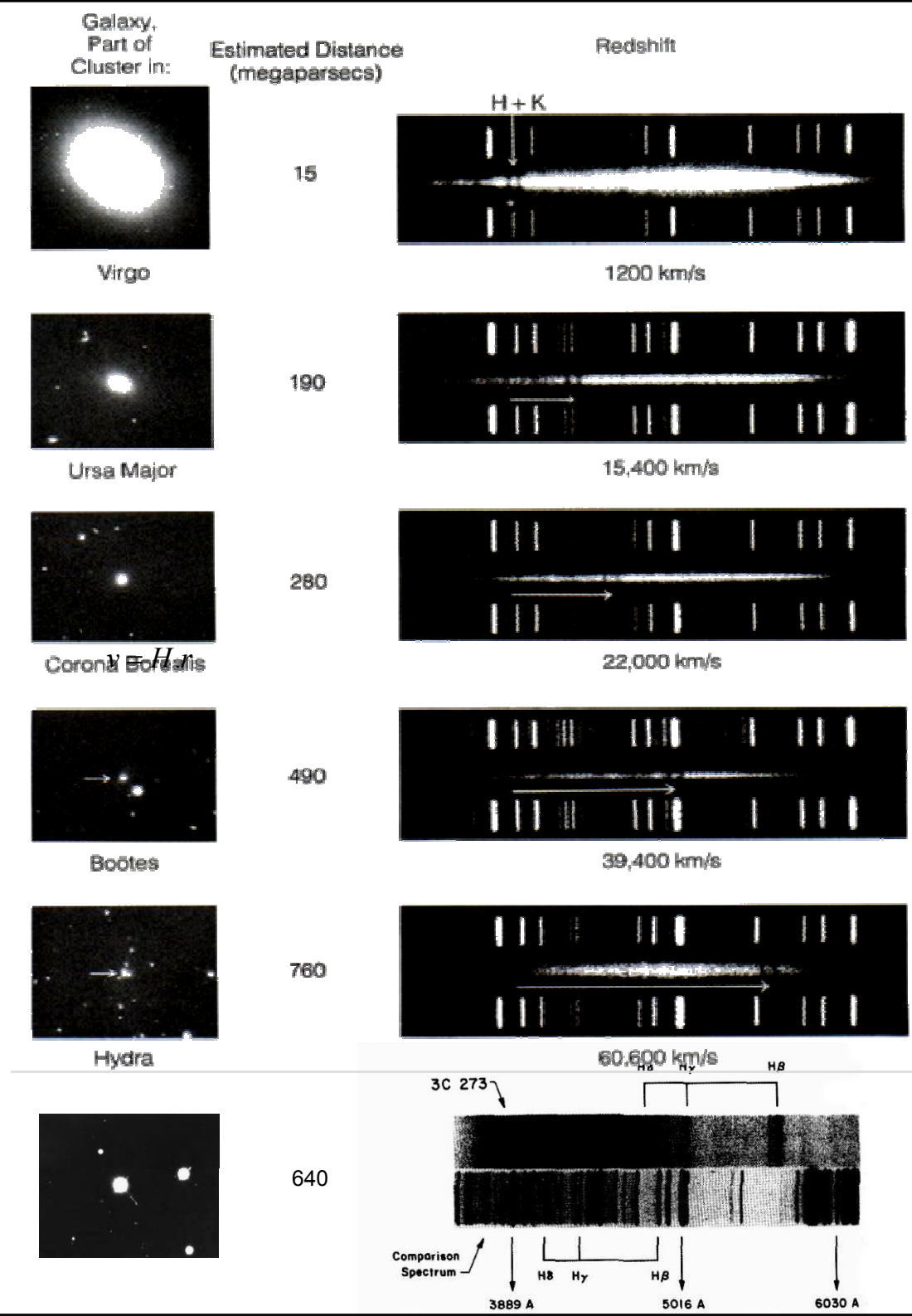
$$v = H \cdot r$$

$$v = c \cdot z = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

pro $z > 0,1$

$$v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

$$z \approx 6$$



Rudý posuv a radiální rychlost

Redshift and radial velocity

In analogy with the form of the nonrelativistic of the Doppler shift expressed in terms of wavelengths,

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \quad \rightarrow \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_r}{c} \right)$$

astronomers define the redshift, z :

$$\lambda = \lambda_0 (1 + z) \quad \rightarrow \quad z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} .$$

This form is used for all radial velocities, even if they're close to the speed of light; remember when you use it that cz is only $\approx v_r$ if $v_r \ll c$.

The largest redshift measured for a galaxy to date is $z = 6.4$.

The largest in Hubble's original sample was $z = 0.004$.

Vesmír - pozorování, kosmologický princip

střed vesmíru – historicky Země (Aristoteles) -> Slunce -> ?

Koperník – poloha Země není ve vesmíru jedinečná

pol. 19. stol. – paralaxy hvězd – umístování Slunce do prostoru mezi hvězdy ->

poloha v Galaxii -> Galaxie -> střed vesmíru neexistuje!

základní paradigma kosmologie:

Žádný bod v prostoru nemá privilegované postavení!

Vlastnosti vesmíru v dostatečně velkém měřítku budou stejné pro všechny pozorovatele.



Vesmír musí být homogenní a izotropní!
(stejnorodý a stejný ve všech směrech)

Kosmologický princip - izotropie

1934 Hubble pročetl počet galaxií do 20. stupně
 je na 1 stupni. stupni přičítá 131 galaxií
 absolutní ofera 41 253 čísel. stupni
 porovnáním počtu galaxií hvězdné magnitudy m , $m+1$
 můžeme stanovit, jak jsou rozloženy v prostoru
 vedeme hvězdné magnitudy galaxií m , absolutní
 hvězdné magnitudy M , vzdálenost r

$$r = 10^{1 - 0.2M} \cdot 10^{0.2m}$$

předpokládáme, že galaxie nacházejí se ve sféře
 s poloměrem r mají stejnou abs. hvězdnou magn. M ,
 jsou rovnoměrně rozloženy. Předpokládáme počet
 do m -lé hvězdné magnitudy je $N(m) \sim r^3$

$$N(m) \sim r^3 \approx 10^{3(1 - 0.2M)} \cdot 10^{0.6m}$$

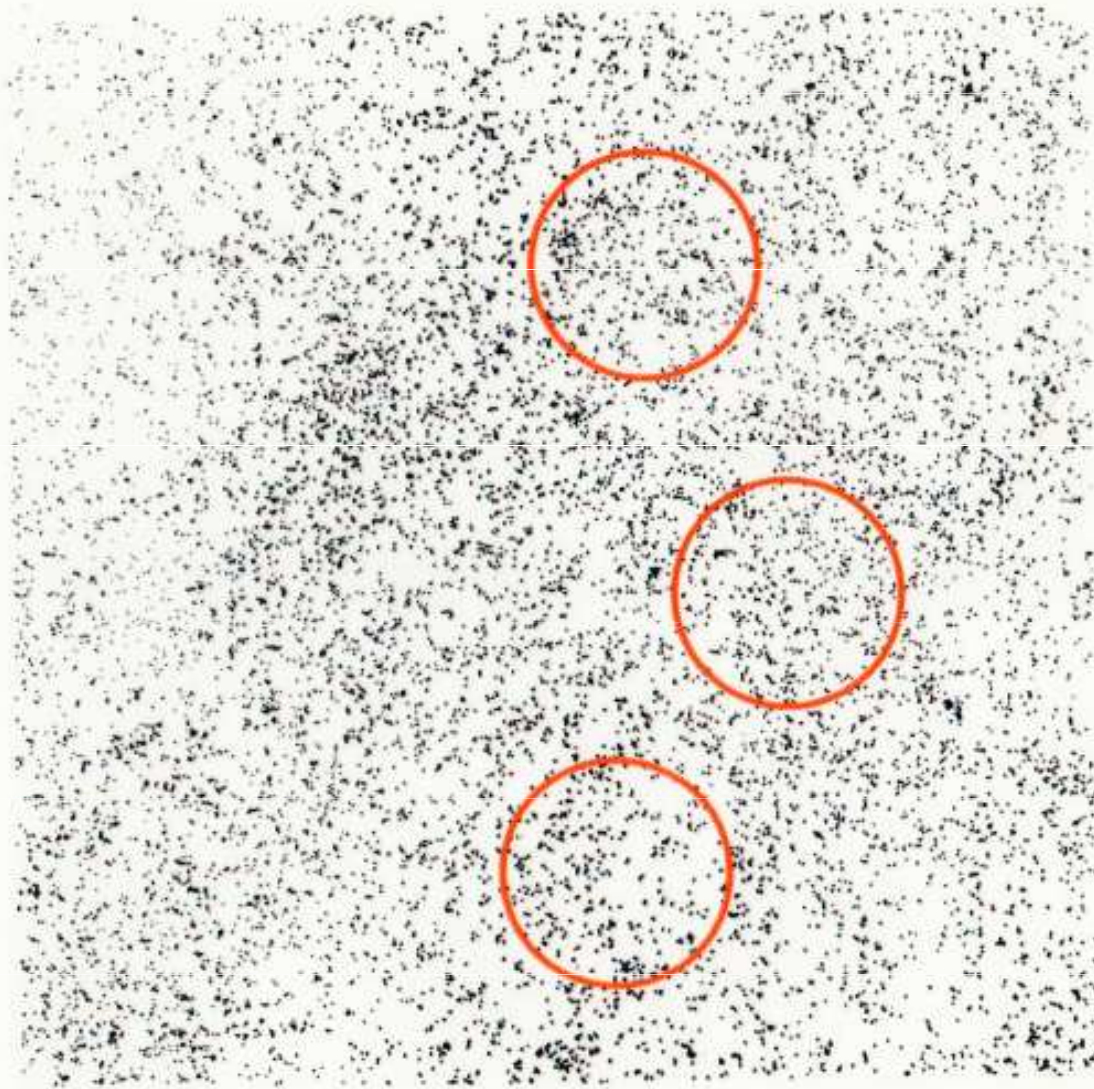
porovnáme počet galaxií s hvězdnou magnitudou
 do $m+1$ k počtu galaxií s hvězdnou magnitudou m

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} = \frac{10^{0.6(m+1)}}{10^{0.6m}} = 10^{0.6} = 3.98 \approx 4$$

Hubble dokázal, že tento poměr je stejný ve
 všech směrech vesmíru. Tedy galaxie jsou
 rovnoměrně rozloženy v prostoru

Kosmologický princip - izotropie

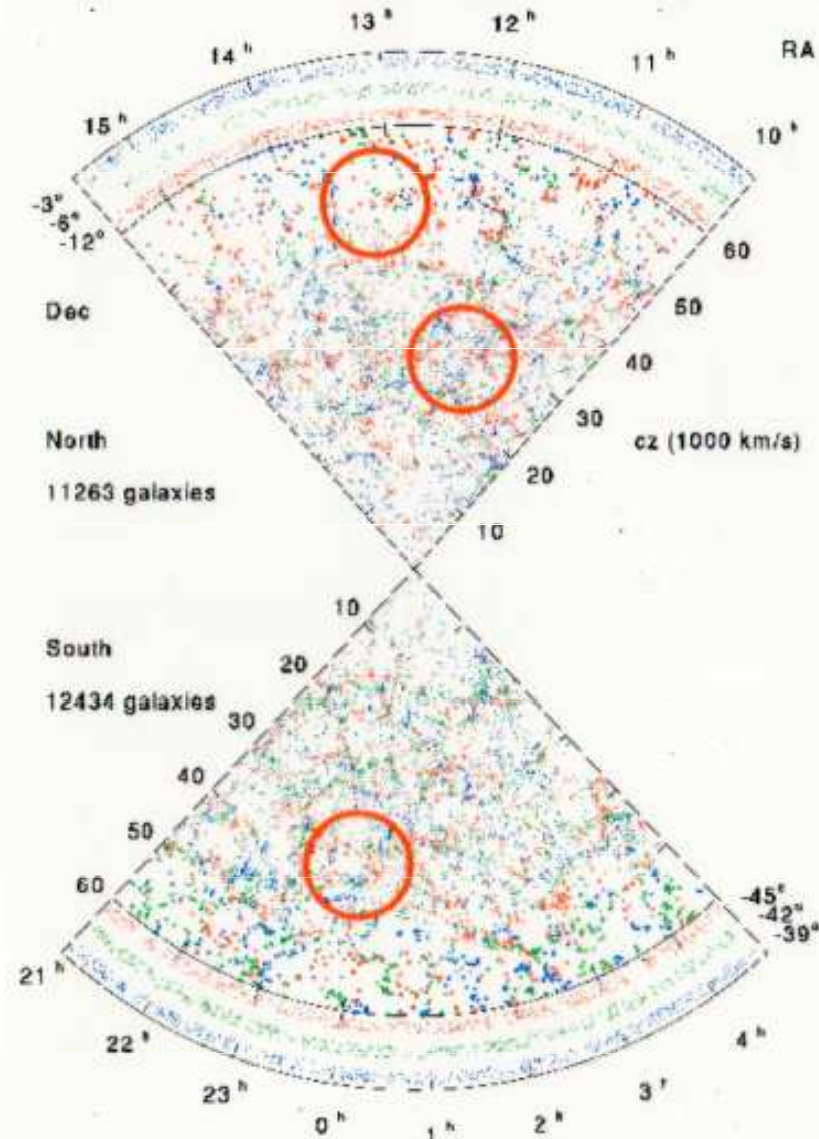
Isotropy of the Universe on large scales: modern measurements (continued)



Isotropy on the scale represented by these circles's diameter means that approximately the same numbers of galaxies are contained within them, no matter where on the sky we put them, which is evidently true in this picture.

Kosmologický princip - homogenita

Homogeneity of the Universe on large scales: modern measurements (concluded)



Homogeneity on the scale of these circles's diameter means that approximately the same numbers of galaxies are contained within them, no matter where we put them within the Universe's volume, which is evidently true in this picture.

Fyzikální kosmologické modely

Newtonův model vesmíru

vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb => **homogenní, izotropní** – v prostoru i čase!

hezké ale!!!

vady Newtonova modelu = **kosmologické paradoxy**:

- **gravitační paradox** - výsledné gravitační pole nekonečného počtu

kosmických objektů => gravitační síly se vykompenzují,

ale potenciály $\rightarrow \infty$

řešení: prázdný vesmír

- **fotometrický paradox – Olbersův, Keplerův ...** - když je hvězd

nekonečně mnoho, proč nevyplní oblohu?

řešení: - hvězdy „nežijí“, nezáří nekonečně dlouho

- vesmír není nekonečný v prostoru i čase; světlo ze stejně vzdálených míst k nám „putuje“ určitou dobu=> ze vzdálenějších oblastí světlo nedolétlo

- vesmír se rozpíná => kosmologický červený posuv záření; snížení intenzity záření

Nejjednodušším důkazem vývoje a časových změn vesmíru je tma v noci.

Fyzikální kosmologické modely

Standardní model

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

1916 **Albert Einstein**: OTR

- rovnice obecné relativity $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
- matematický popis faktu, že hmota kolem sebe zakřivuje prostor a čas
- $\kappa = 8\pi G/c^4$ pro slabá pole Einsteinovy rovnice -> Newtonův gravitační zákon
- vesmír statický => 1917 kosmologická konstanta Λ

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

1922 **Alexandr Fridman** - řešení rovnic OTR (včetně Λ) popisujících vývoj vesmíru v čase => vesmír není statický, ale dynamický!



1927 **Georges Lemaître** - nezávislé potvrzení Fridmanových výpočtů (potvrzením objev rozpínání vesmíru)



1929 **Edwin Hubble** – objev vzdalování se galaxií, rozpínání vesmíru

1931 **Albert Einstein** – kosmologická konstanta = největší omyl života (později kosm. konstanta rehabilitována)



Obecná teorie relativity

Einsteinovy rovnice grav. pole:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R - \Lambda g_{ik} = - \frac{8\pi K}{c^4} T_{ik}$$

T_{ik} .. ^{čtyřrozměrny} tenzor
energie - ^{hybnosti} - impulsu

$T_{ik} = T_{ki}$.. symetrický tenzor

g_{ik} .. metrický tenzor

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Obecná teorie relativity

R - invariant křivosti

R_{ik} - Ricciův tenzor

Λ - kosmologické konstanty

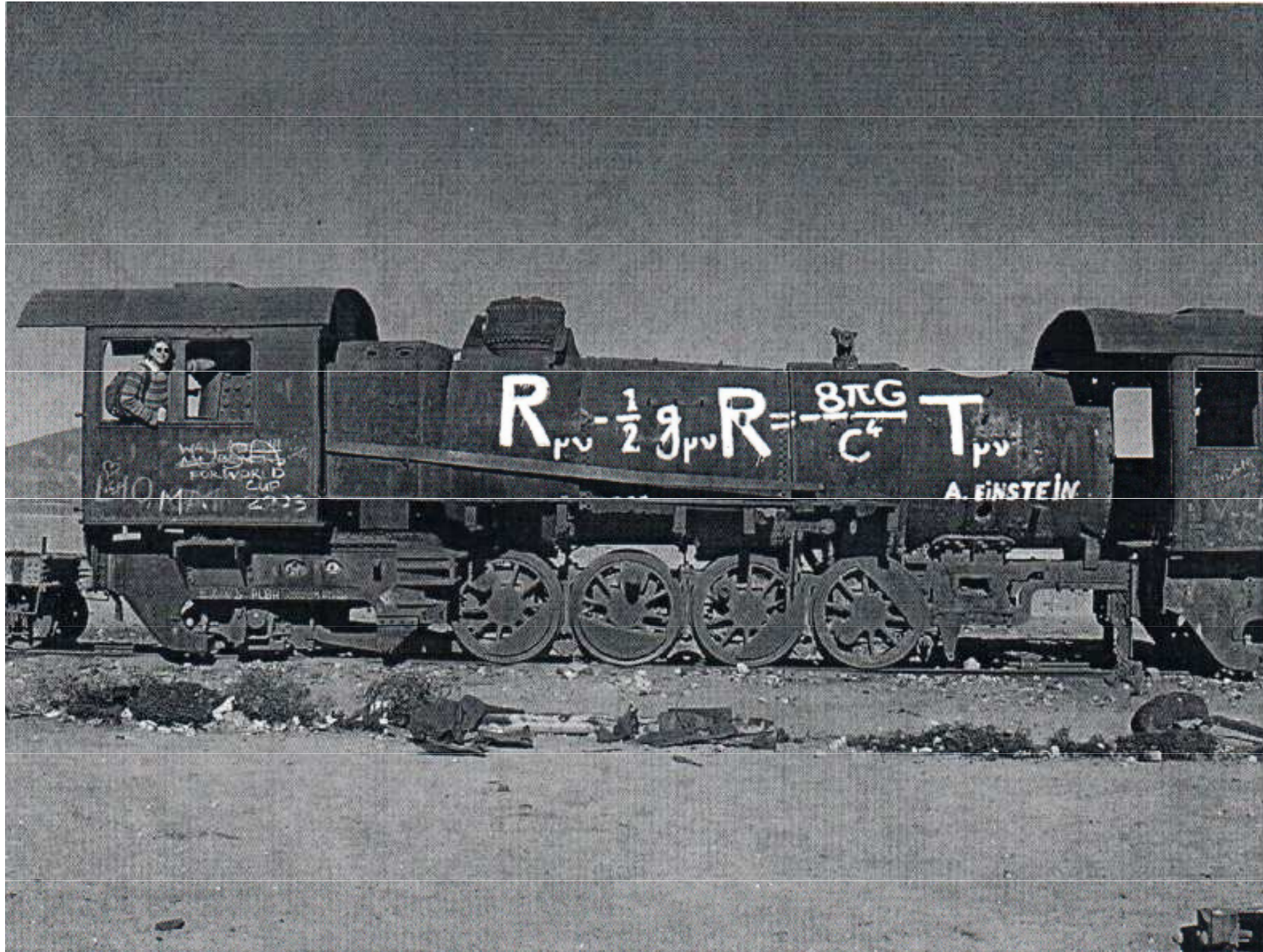
.. Einsteinova rovnice

$$\mathcal{R} = + \frac{8\pi k}{c^4} \approx 7,4 \cdot 10^{-28} \text{ s}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

R_{ik} - ukazuje, jak se mění geometrie časoprostoru
od euklidovské geometrie

g_{ik} - tenzor určuje vzdálenost mezi dvěma
blízkými body

Obecná teorie relativity



Alexander Alexandrovič Friedmann

1888 - 1925

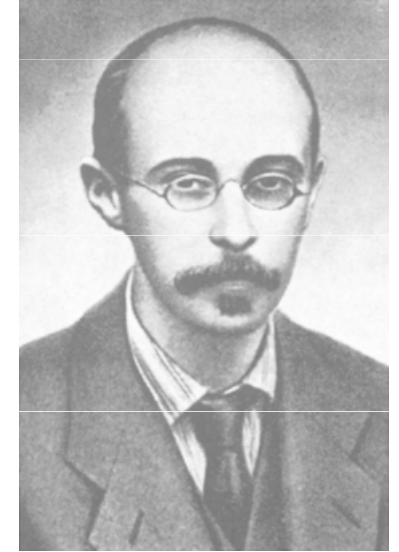
ruský matematik, meteorolog, kosmolog, články

O křivosti prostoru 1922

O možnosti světa s konstantní zápornou křivostí 1924

že vývojový nestacionární model vesmíru (zakřivený, uzavřený, konečný a bez hranic) je možný i

bez tzv. Λ členu



Georges Henri Lemaitre 1894 - 1966

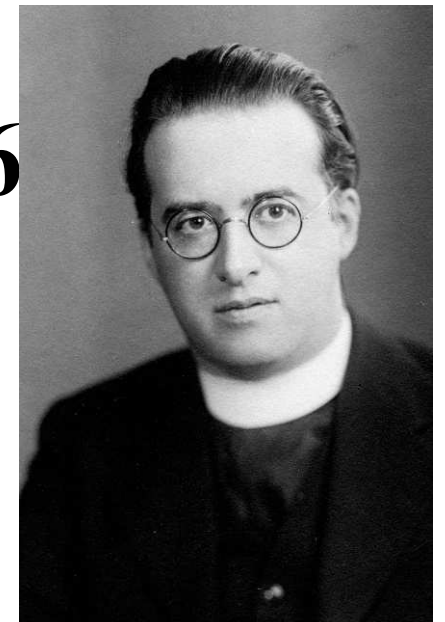
belgický matematik, kosmolog, článek

Homogenní vesmír o konstantní hmotnosti

a rostoucím poloměru se započítáním

radiálních rychlostí extragalaktických mlhovin 1927

existence nestacionárních modelů vesmíru



Friedmannovy rovnice

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} - \Lambda g_{ik} = - \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

$R = R(t)$... plošnice křivosti prázdná, $\Lambda = 0$

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} + 2 \frac{\ddot{R}}{R} = - \frac{kc^2}{R^2} \quad (1) \quad k \begin{cases} -1 \\ 0 \\ +1 \end{cases}$$

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8\pi G}{3} \rho = - \frac{kc^2}{R^2} \quad (2)$$

do rovnice zadáme $H = \frac{\dot{R}}{R}$ i $q = - \frac{\ddot{R}}{R} \cdot \frac{1}{H^2}$

či $\frac{\dot{R}^2}{R^2} = H^2$ a vyjádření $\frac{1}{c^2}$ (2)

$$\Rightarrow \frac{k}{R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3c^2} - \frac{H^2}{c^2} \quad \text{i pro } k=0 \Rightarrow$$

$$\rho_k = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Friedmannovy modely vesmíru

A. Friedmann^{*}, modely vesmíru - ^{*(1888-1925)} po ukončení inflac

a) $k = +1$ zakřivení kladné, uzavřený
eliptický vesmír, $\rho > \rho_k$, konečný
objem a počet částic, $v < v_k$

Friedmannovy modely vesmíru

a) $k = 0$ řešení nulové, euklidovský
model vesmíru, $\rho = \rho_k$, vesmír je
stejný, nekonečný, počet částic
i objem jsou nekonečné, $v = v_k$

c) $k = -1$ řešení záporné, otevřený
hyperbolický model vesmíru,
 $\rho < \rho_k$, otevřený, nekonečný,
počet částic i objem jsou nekonečné
 $v > v_k$, rozměry rostou!

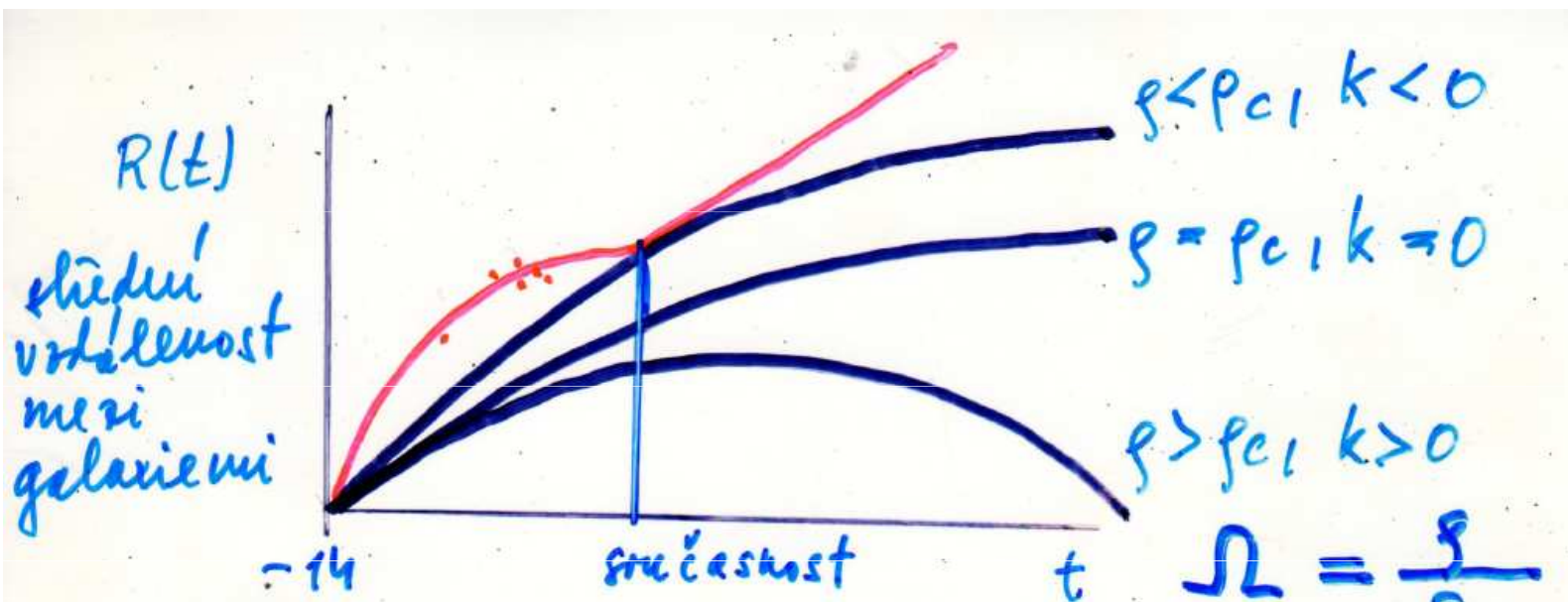
$$\text{z rovnice (1), (2) } \Rightarrow H^2(2q - 1) = k \frac{c^2}{R^2}$$

$$a) k > 0 \Rightarrow q > 1/2$$

$$b) k = 0 \Rightarrow q = 1/2$$

$$c) k < 0 \Rightarrow q < 1/2$$

Vývoj vesmíru



inflační fáze vzniká ve velmi
 v době $(10^{-35} - 10^{-32})$ s

A. Guth

~ 1980

oddělení silné interakce od elektromagnetické
 na počátku vznikají všechny interakce spojené,
 postupně se jednotlivé interakce oddělují

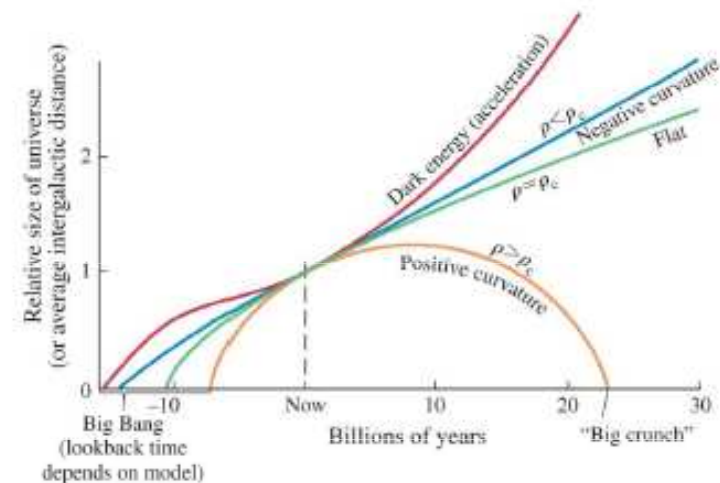
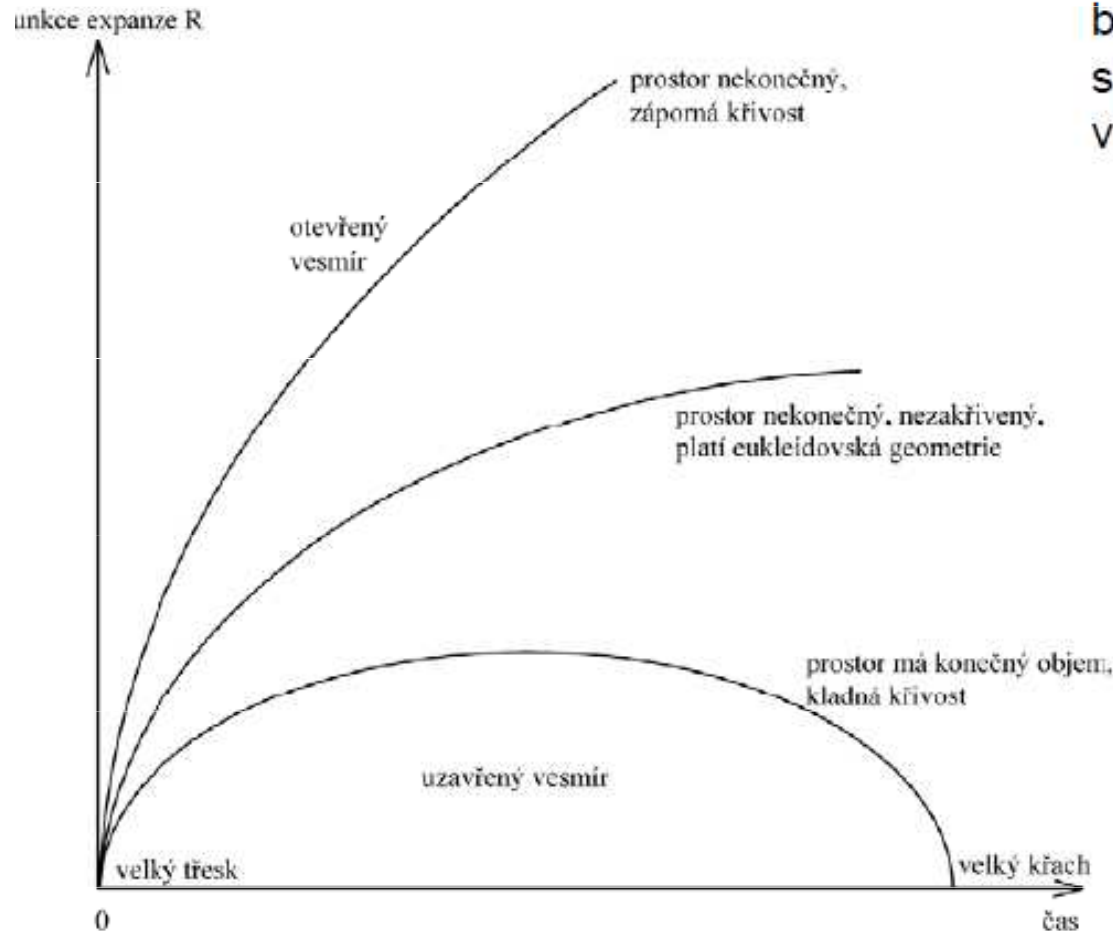
současný poleh - $k < 0$, rychlostní
 rozplutí vesmíru

Friedmannovy modely vesmíru

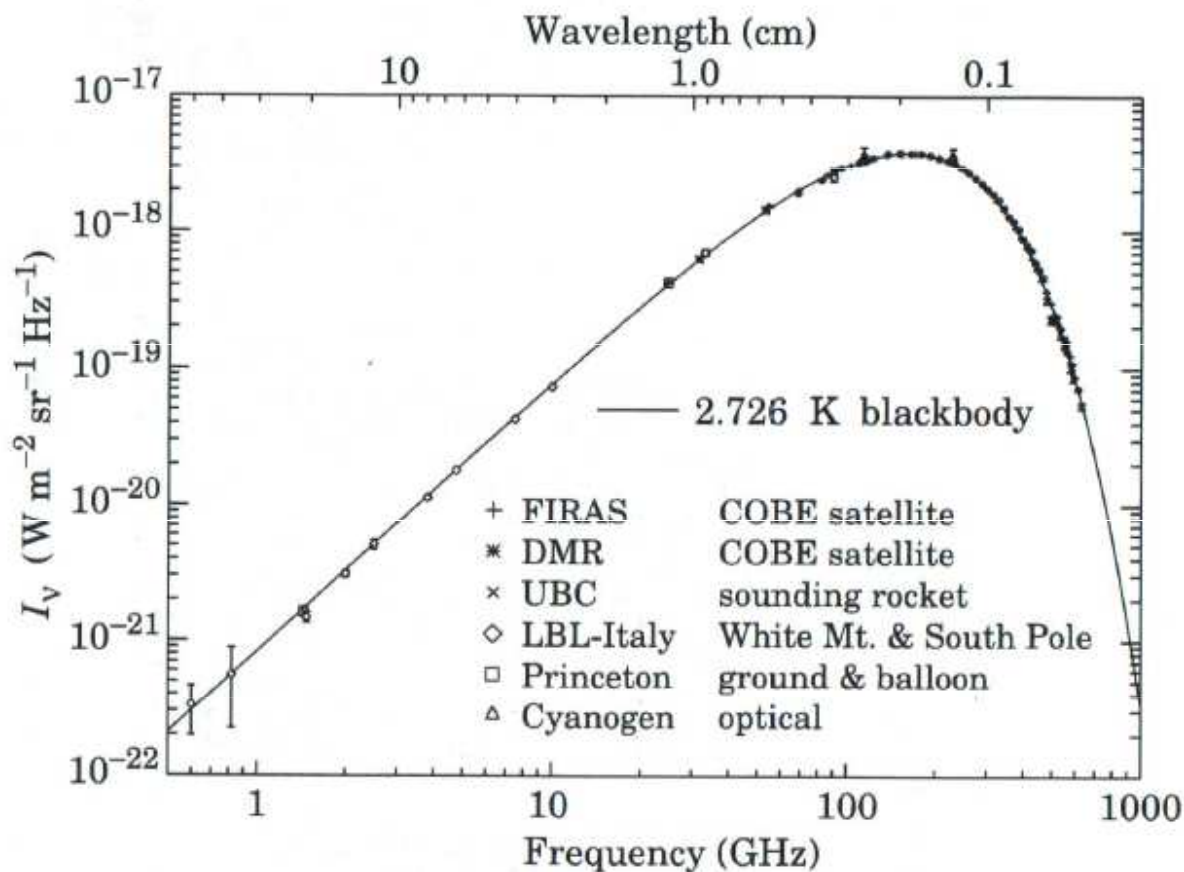
Fridmanovy modely

v počátečních fázích se vesmír rozpíná, expanze vesmíru probíhá buď stále nebo se může změnit ve smršťování

Funkce expanze (škálovací faktor) R :
bezrozměrné číslo, (udává, jak se s časem mění vzdálenosti ve vesmíru)



Reliktní záření



(Smoot et al., 1997, Fig. 1)

Penzias & Wilson (1965):
“Measurement of Excess
Antenna Temperature at
4080 Mc/s”

⇒ Cosmic Microwave
Background radiation (CMB)

CMB spectrum is
blackbody with temperature
 $T_{\text{CMB}} = 2.728 \pm 0.004 \text{ K}$.

Nobelova cena r. 1978

THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND RADIATION

Nobel Lecture, 8 December, 1978

by

ROBERT W. WILSON

Bell Laboratories

Holmdel, N.J. U.S.A.

1. INTRODUCTION

Radio Astronomy has added greatly to our understanding of the structure and dynamics of the universe. The cosmic microwave background radiation, considered a relic of the explosion at the beginning of the universe some 18 billion years ago, is one of the most powerful aids in determining these features of the universe. This paper is about the discovery of the cosmic microwave background radiation. It starts with a section on radio astronomical measuring techniques. This is followed by the history of the detection of the background radiation, its identification, and finally by a summary of our present knowledge of its properties.

Nobelova cena r. 1978

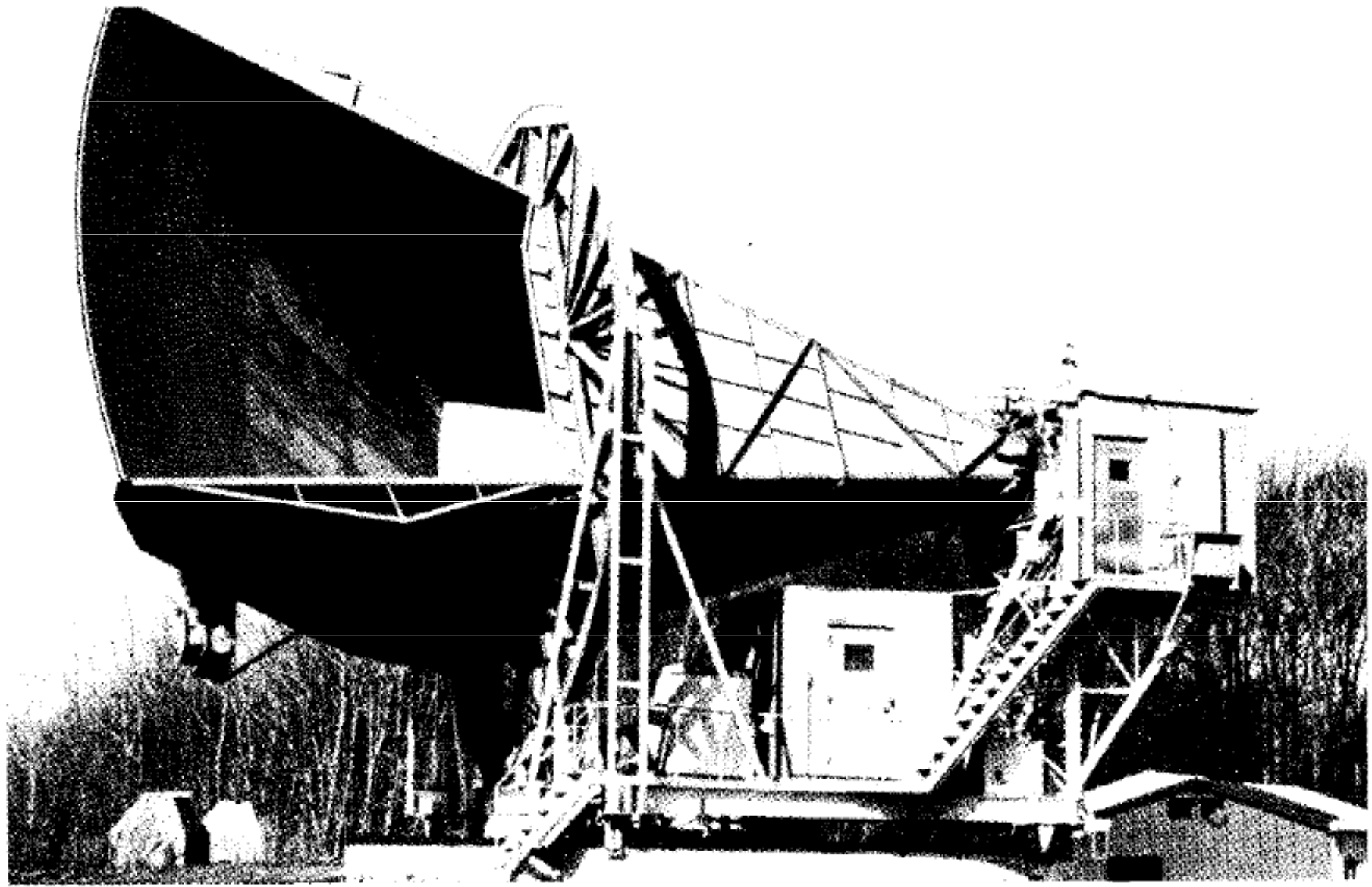


Fig. 1 The 20 foot horn-reflector which was used to discover the Cosmic Microwave Background Radiation.