

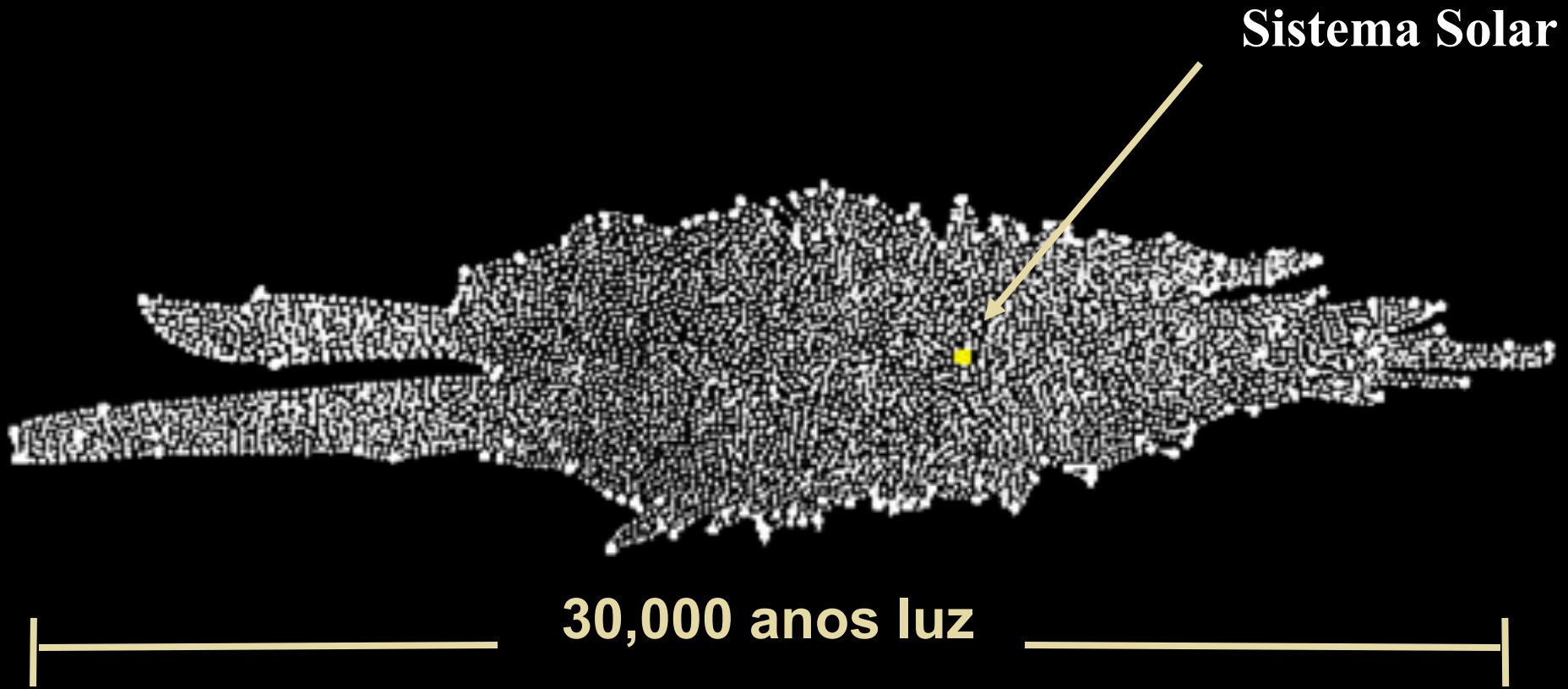
DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



SEMINÁRIO DO PROGRAMA ENSINO DE FÍSICA - 10/04/2012

Ioav Waga

O Universo por volta de 1900 d.C.



William Herschel
(1738-1822)

Questão chave há 100 anos!

Qual é a natureza das nebulosas espirais?

- ▶ **Objetos em nossa própria galáxia?**
- ▶ **Objetos distantes semelhantes à Via Láctea?**



Andrômeda

Grande Debate 1920

Heber D. Curtis x Harlow Shapley

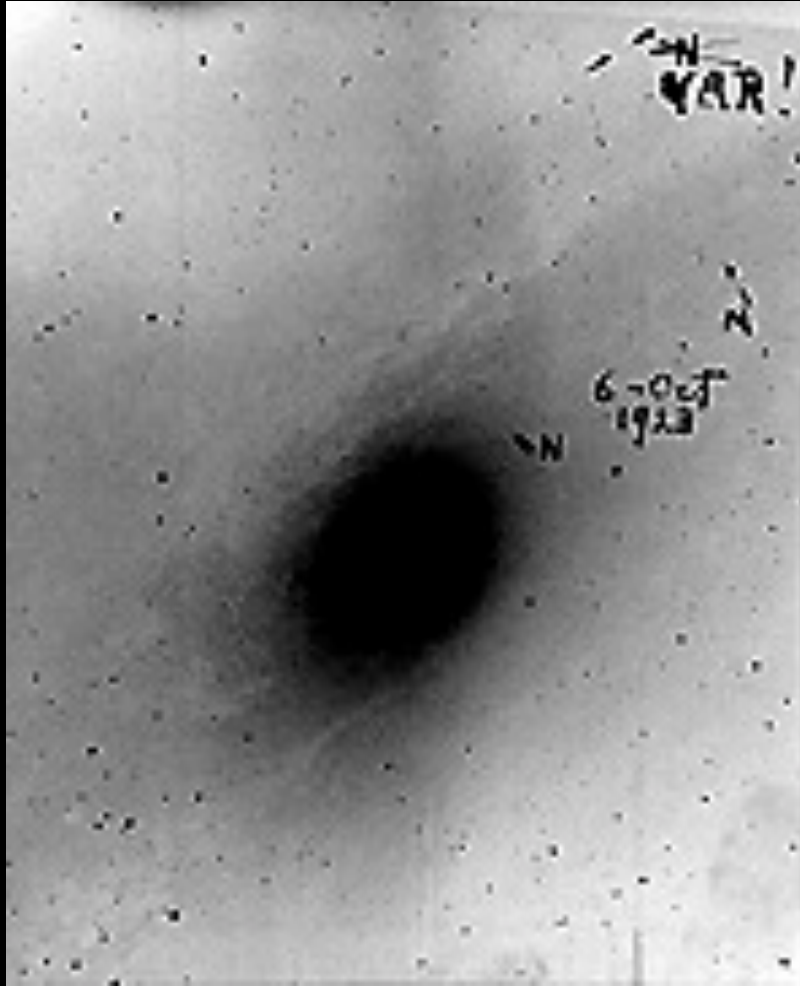


H. D. Curtis



H. Shapley

Hubble e a descoberta de galáxias



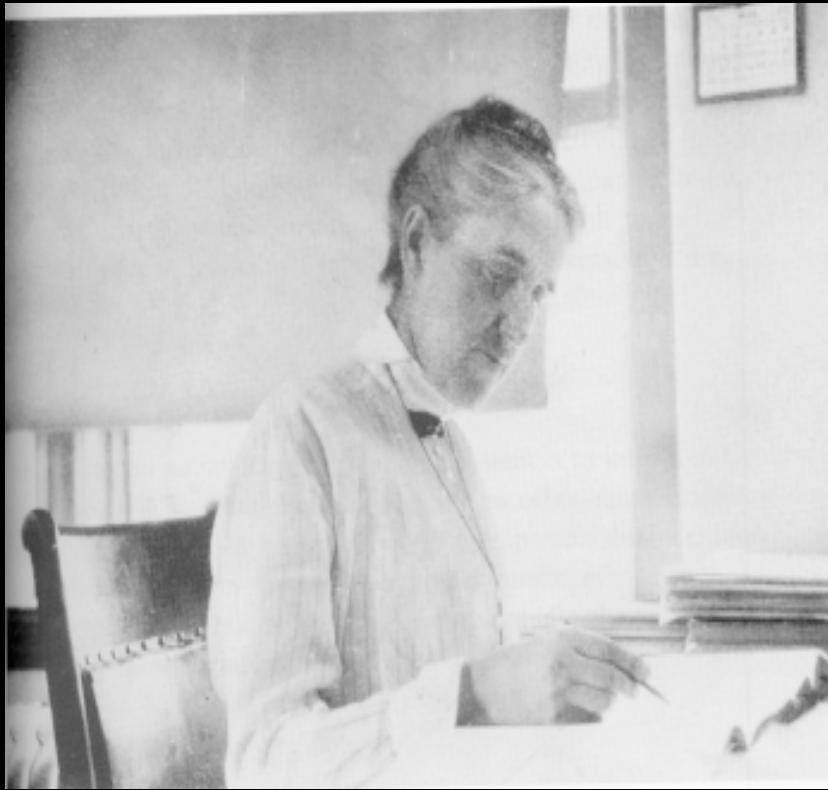
Andrômeda

1923 - Hubble observa uma variável Cefeida em Andrômeda.



Edwin Powel Hubble: 20/11/1889 - 28/9/1953

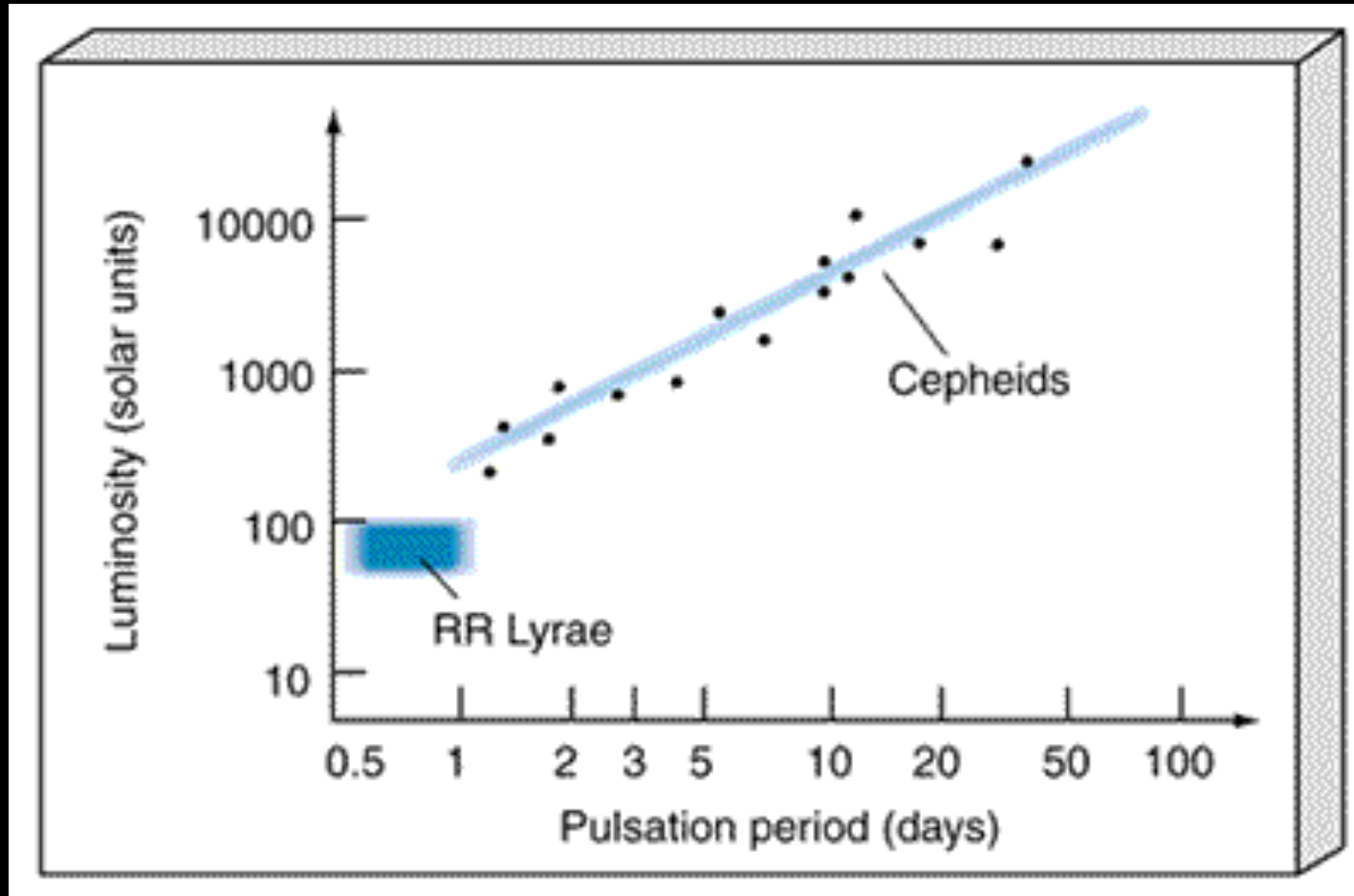
Hubble e a descoberta de galáxias



Henrietta Swan Leavitt

- Em 1912 Henrietta Swan Leavitt, uma astrônoma do “Harvard College Observatory”, observou uma correlação entre a luminosidade absoluta média de estrelas do tipo cefeida e o período de sua variação.
- Quanto maior o período maior a luminosidade.

Hubble e a descoberta de galáxias



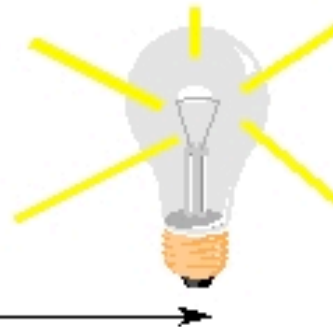
Vela Padrão

O fluxo de energia é proporcional à luminosidade e inversamente proporcional ao quadrado da distância.



0,5 metro

$$f = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$



1,0 metro

Hubble e a descoberta de galáxias



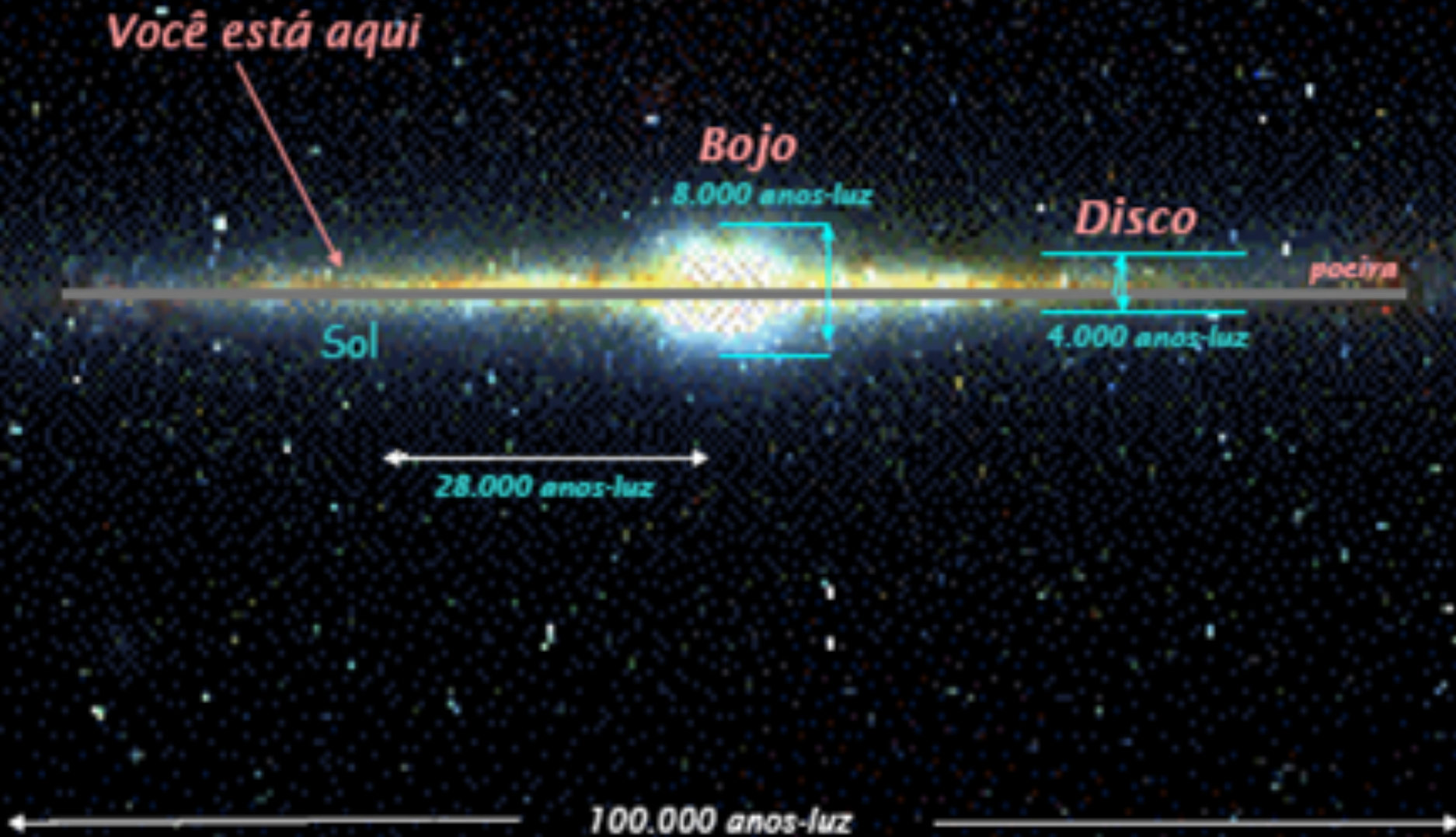
Hubble no telescópio Schmidt no monte Palomar, Califórnia

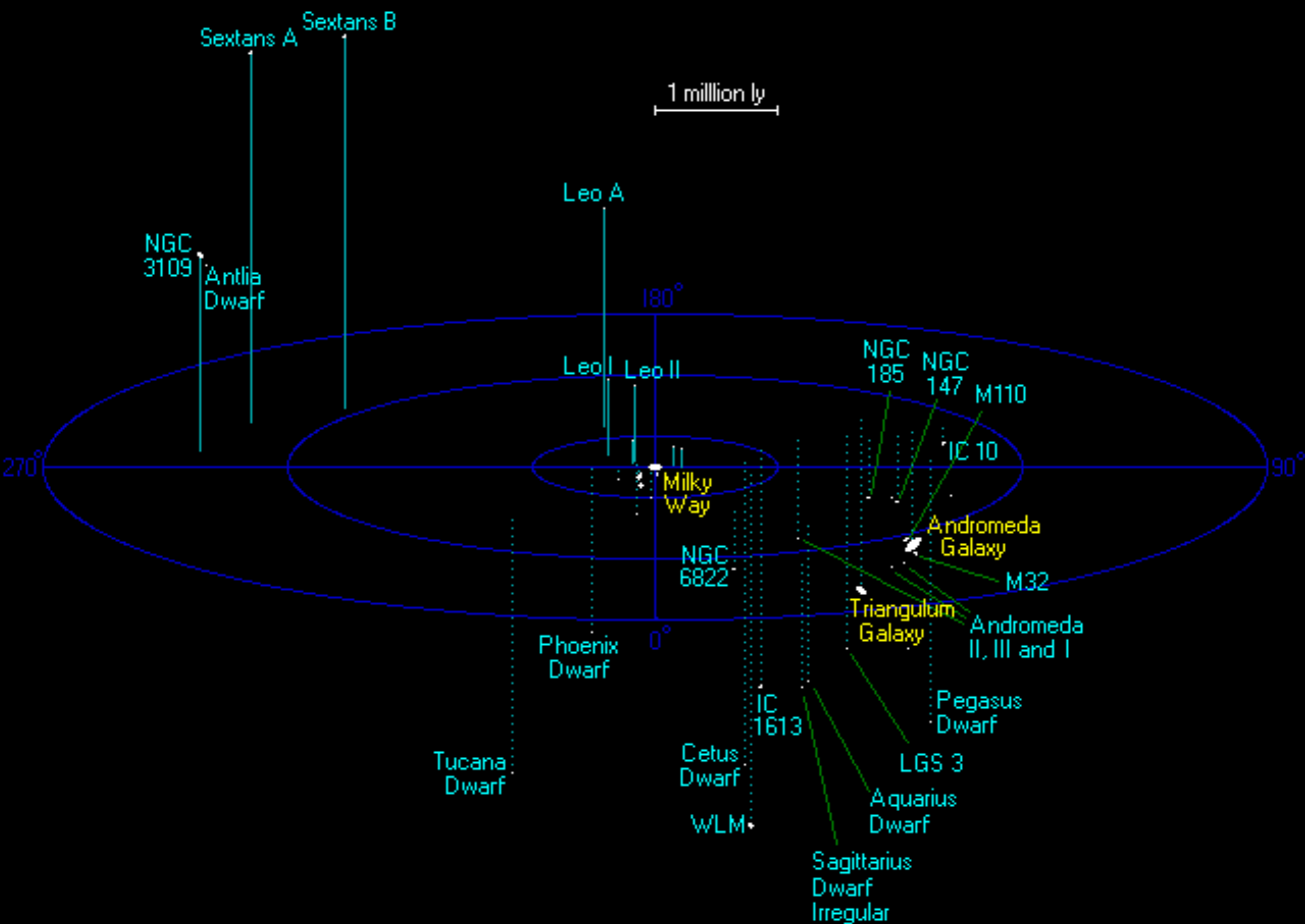
- Portanto, medindo o período de variação e o fluxo de energia da cefeida, Hubble pode determinar a nossa distância à Andrômeda.
 - Sabia-se à época que o raio da nossa galáxia é bem menor que o valor obtido por Hubble.
 - Hoje sabemos que a distância à Andrômeda é $\sim 670\ 000$ parsecs. (1pc=3,26 anos-luz)
- O raio da nossa galáxia é $\sim 15\ 000$ parsecs.
- A conclusão era inescapável: Andrômeda é de fato uma galáxia espiral semelhante à nossa e que está fora da Via Láctea.

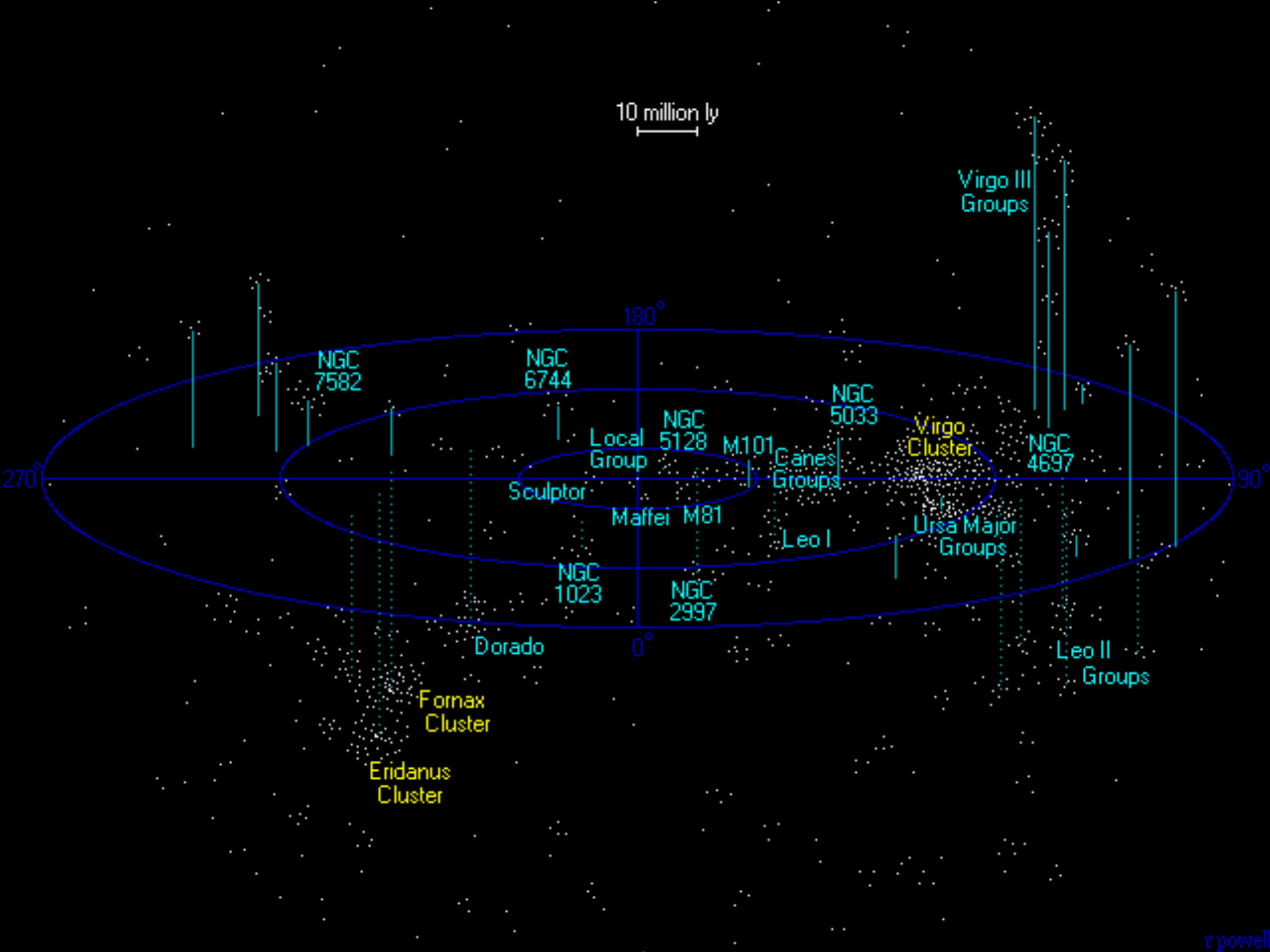


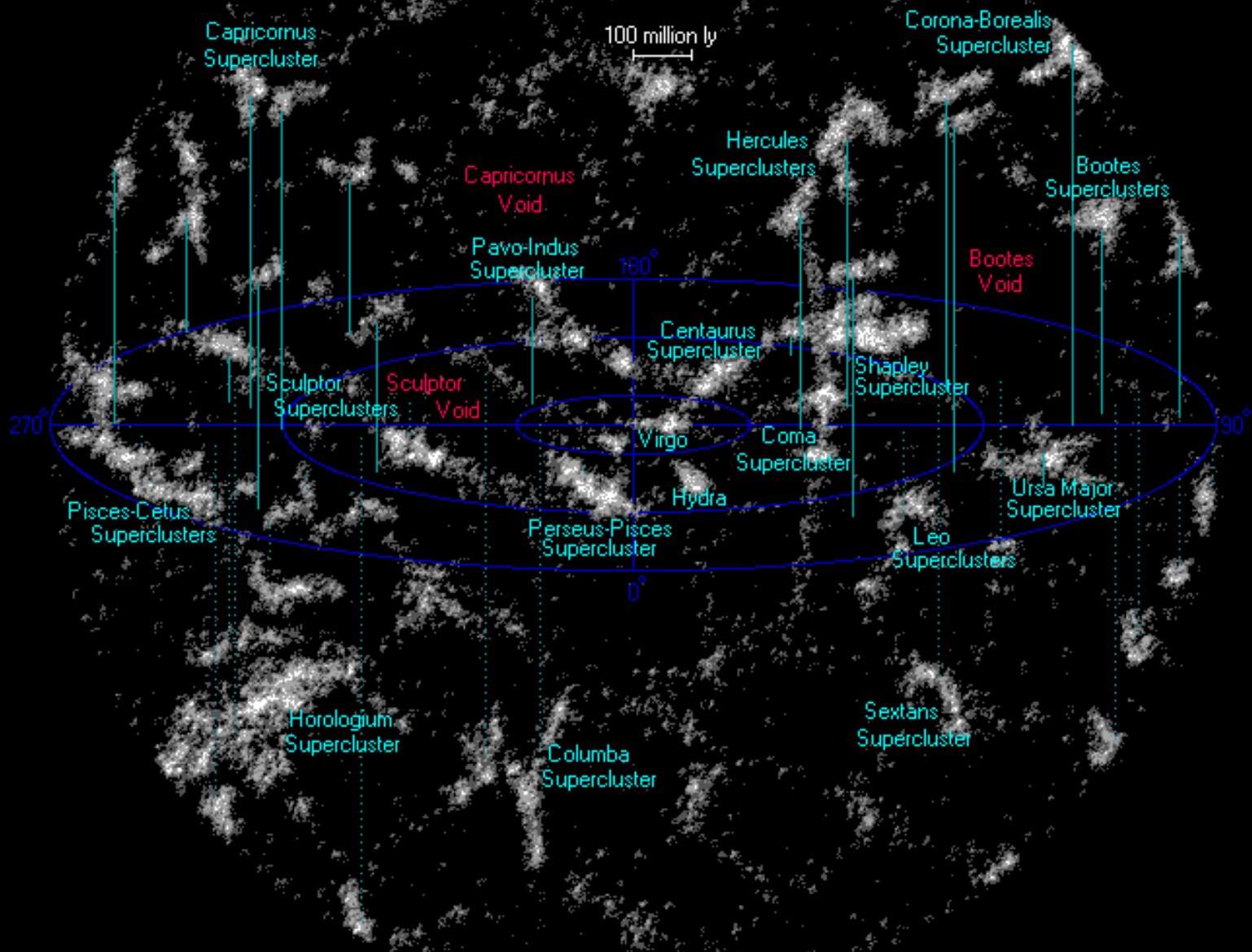
ANDRÔMEDA

Um esquema de nossa galáxia









Distância ou tamanho	Simbolo	Valor	Valor Relativo
Raio da Terra	R_T	6371 Km	
Raio do Sol	R_S	696000 Km	100 R_T
Distância Terra - Sol	AU	150×10^6 Km	200 R_S
1 parsec	pc	3.09×10^{13} Km	200000 AU
Estrela + próxima	R_*	1.275 pc	$7 \times 10^7 R_S$
Distância Sol - centro da galáxia	R_G	10 kpc	8000 R_*
Raio do grupo local (Andrômeda)	R_A	670 kpc	70 R_G
Aglomerado + próximo (Virgem)	R_V	$11 h^{-1}$ Mpc	30 R_A
Raio do Universo observável	R_U	$3000 h^{-1}$ Mpc	300 R_V

Idade

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**
- **Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**
- **Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.**
- **Os primeiros humanóides aparecem na última semana.**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**
- **Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.**
- **Os primeiros humanóides aparecem na última semana.**
- **A nossa espécie (homo sapiens) só surge há 4 horas.**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**
- **Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.**
- **Os primeiros humanóides aparecem na última semana.**
- **A nossa espécie (homo sapiens) só surge há 4 horas.**
- **A agricultura foi inventada na última hora.**

Idade

- **Universo – ~ 14 bilhões de anos**
- **Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)**
- **Primeiras formas de vida (35 anos atrás)**
- **A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)**
- **Plantas e animais na terra (4 anos atrás)**
- **Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.**
- **Os primeiros humanóides aparecem na última semana.**
- **A nossa espécie (homo sapiens) só surge há 4 horas.**
- **A agricultura foi inventada na última hora.**
- **O Brasil foi descoberto há 3 minutos.**

A expansão do Universo e a lei de Hubble

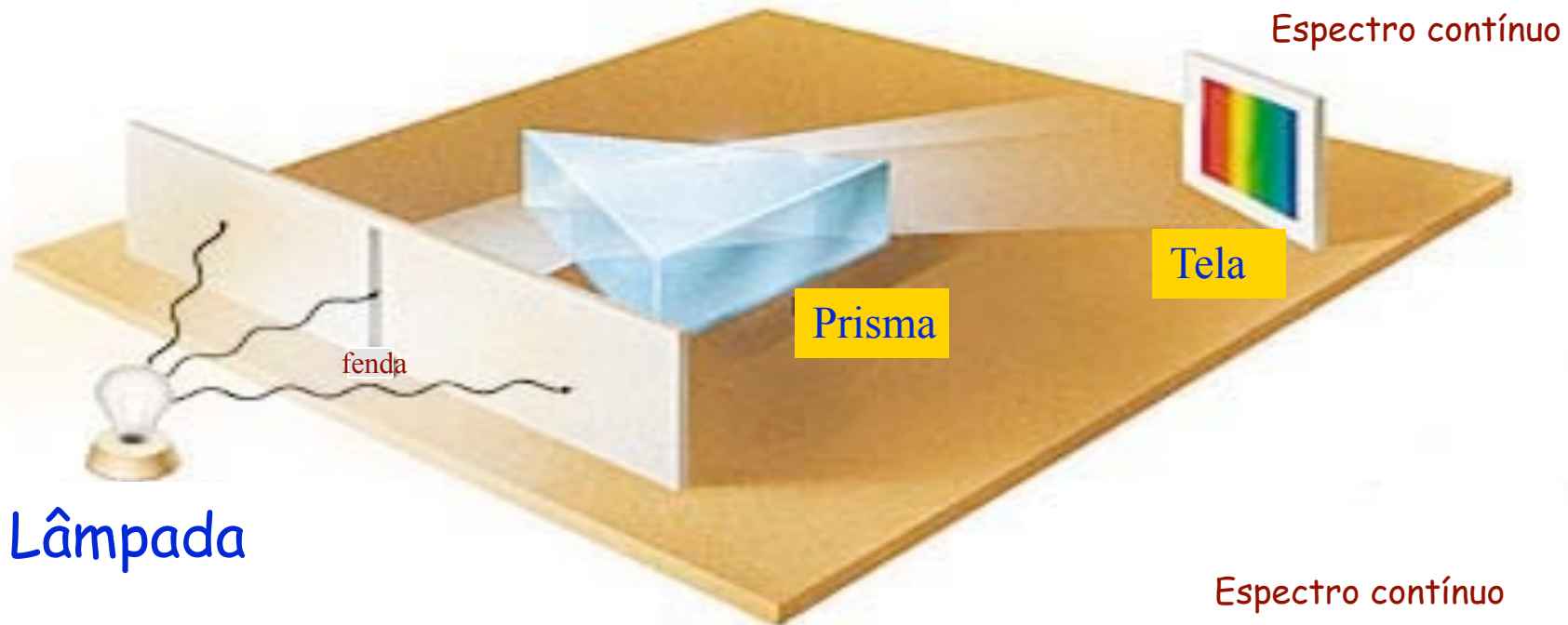


Percival Lowell

- 1901, Vesto M. Slipher é contratado para trabalhar no Observatório Lowell.
- durante mais de 10 anos ele analisou o **espectro da luz** vinda de estrelas e nebulosas.

O espectro da luz

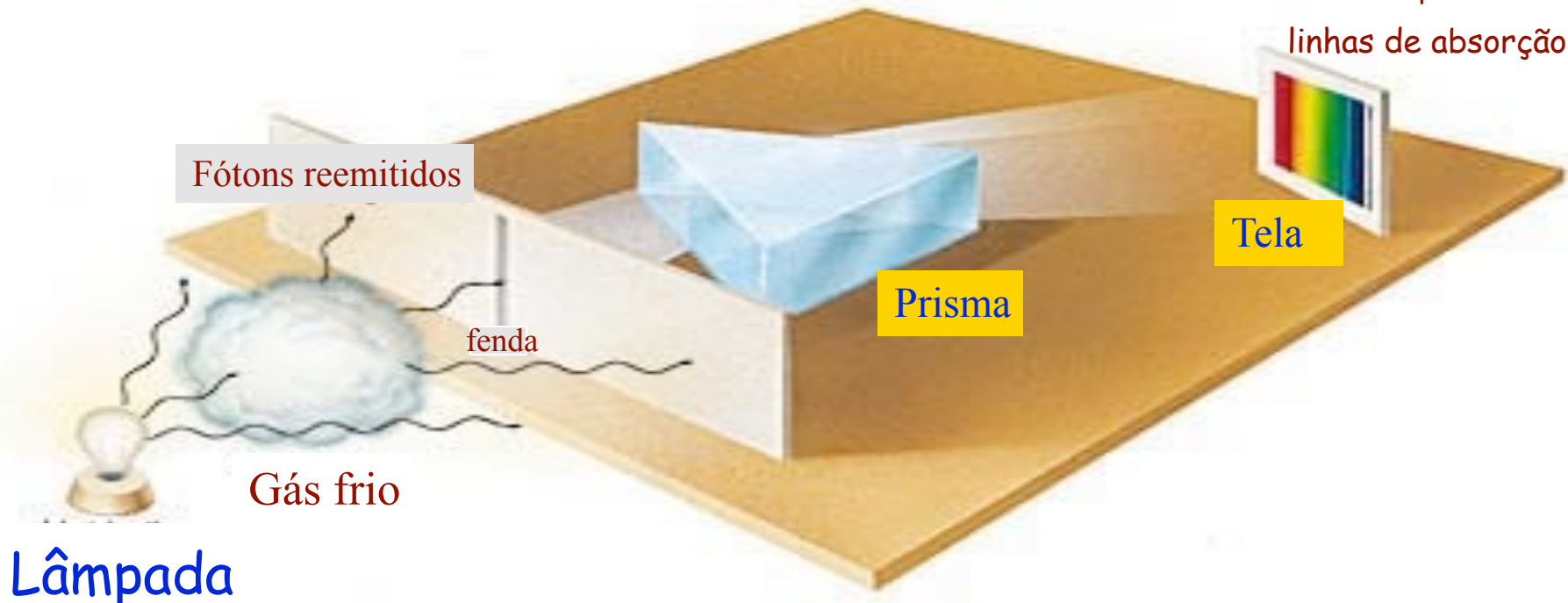




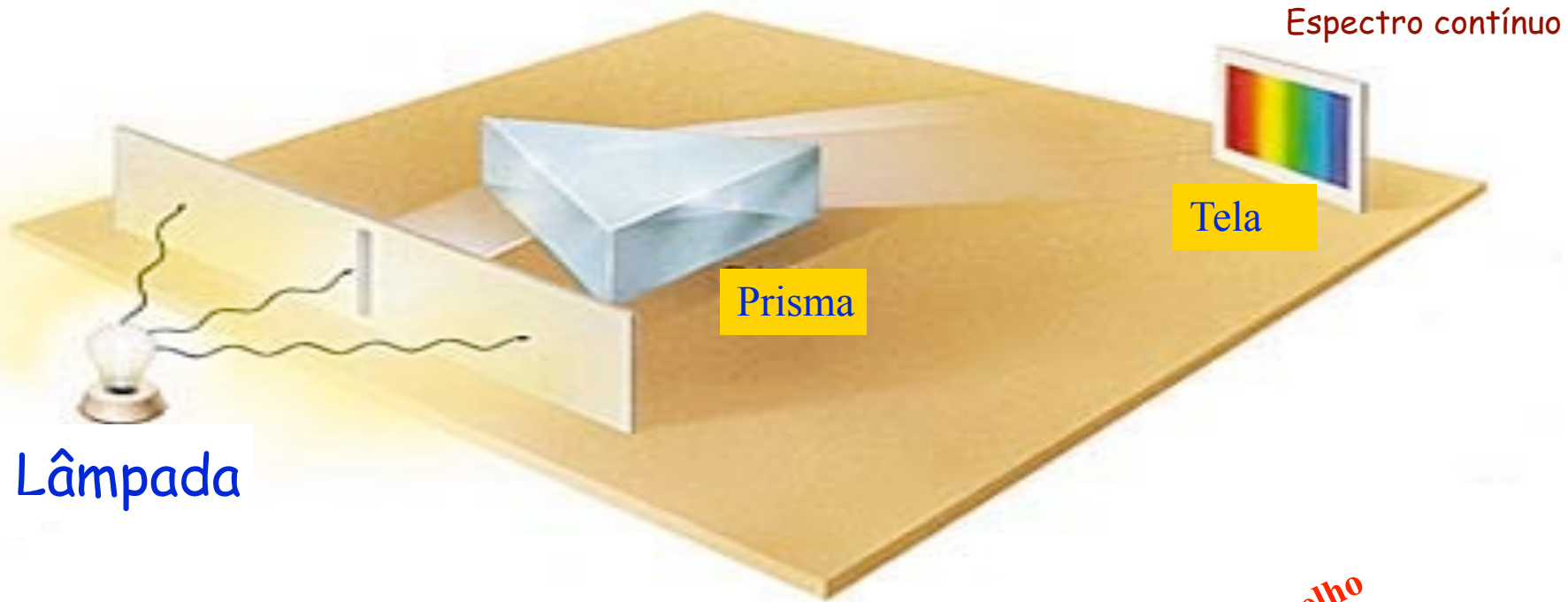
30/05/2025

Lâmpada

Espectro contínuo
+
linhas de absorção



Lâmpada





Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos

Hidrogênio



Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos



Hidrogênio



Sódio



Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos



Hidrogênio



Sódio



Hélio



Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos



Hidrogênio



Sódio



Hélio



Neônio



Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos



Hidrogênio



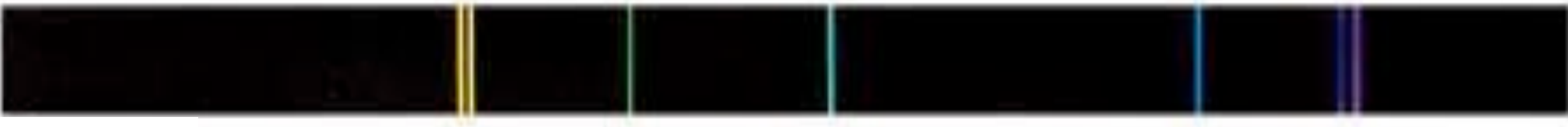
Sódio



Hélio



Neônio



Mercúrio

Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos

A expansão do Universo e a lei de Hubble



V. M. Slipher

- Em 1912 Slipher percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam no lugar errado, elas estavam deslocadas para o azul (maior frequência).

A expansão do Universo e a lei de Hubble



V. M. Slipher

- Em 1912 Slipher percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam no lugar errado, elas estavam deslocadas para o azul (maior frequência).

Como interpretar o resultado de Slipher?

A expansão do Universo e a lei de Hubble



- 1842 - Efeito Doppler

Christian Doppler

A expansão do Universo e a lei de Hubble



• 1842 - Efeito Doppler

$$z = \frac{\text{desvio para o vermelho}}{\text{velocidade da fonte}} = \frac{\text{velocidade da fonte}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{f_{\text{ref fonte}} - f_{\text{obs}}}{f_{\text{obs}}}$$

$C = 300\,000 \text{ km/seg}$

Válido para v muito menor que c

Christian Doppler

A expansão do Universo e a lei de Hubble



Christian Doppler

• 1842 - Efeito Doppler

$$z = \frac{\text{desvio para o vermelho}}{\text{velocidade da fonte}} = \frac{\text{velocidade da fonte}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{f_{\text{ref fonte}} - f_{\text{obs}}}{f_{\text{obs}}}$$

$C = 300\,000 \text{ km/seg}$ Válido para v muito menor que c

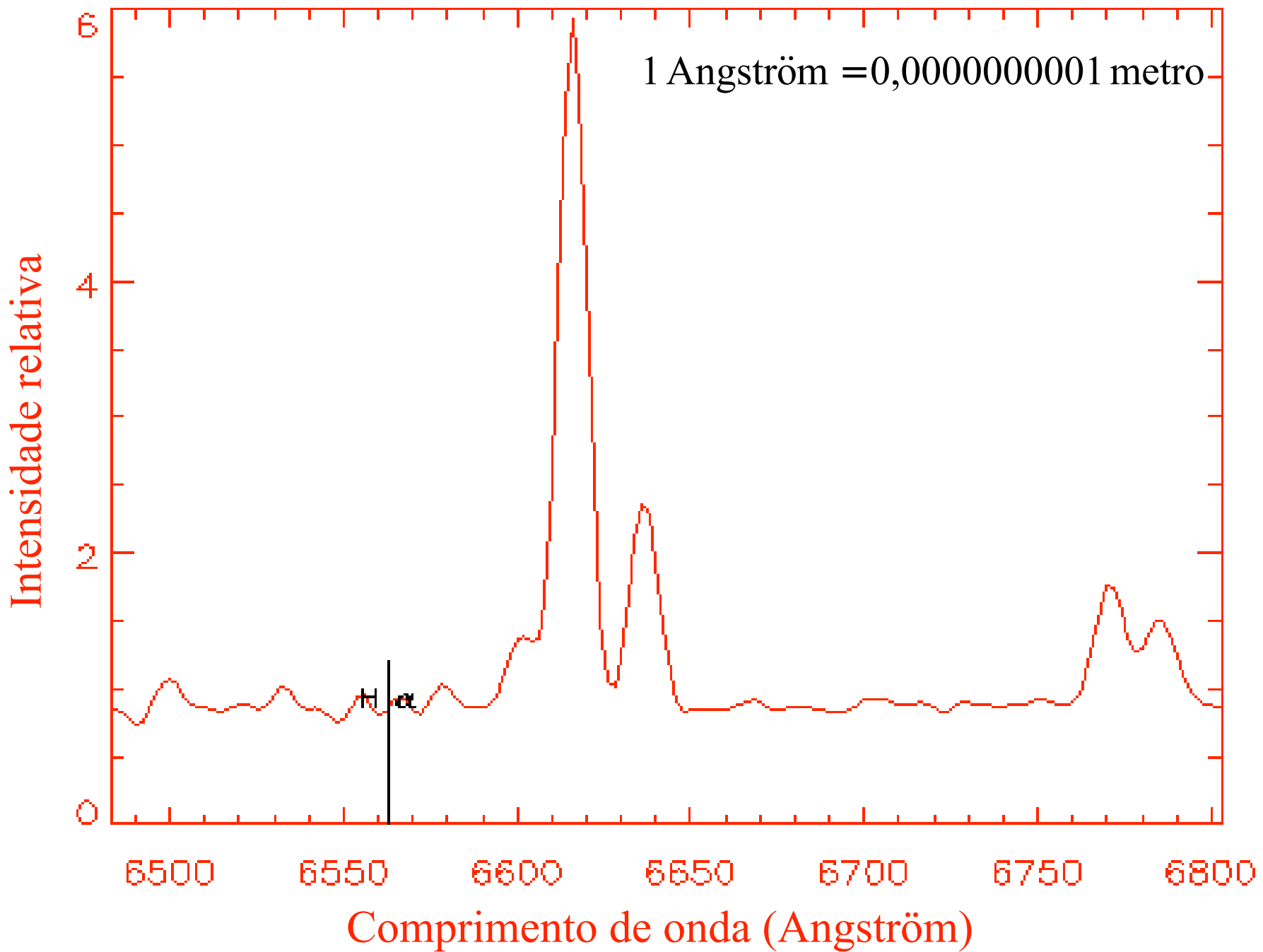
Portanto a interpretação do resultado de Slipher é que Andrômeda está se aproximando de nós.



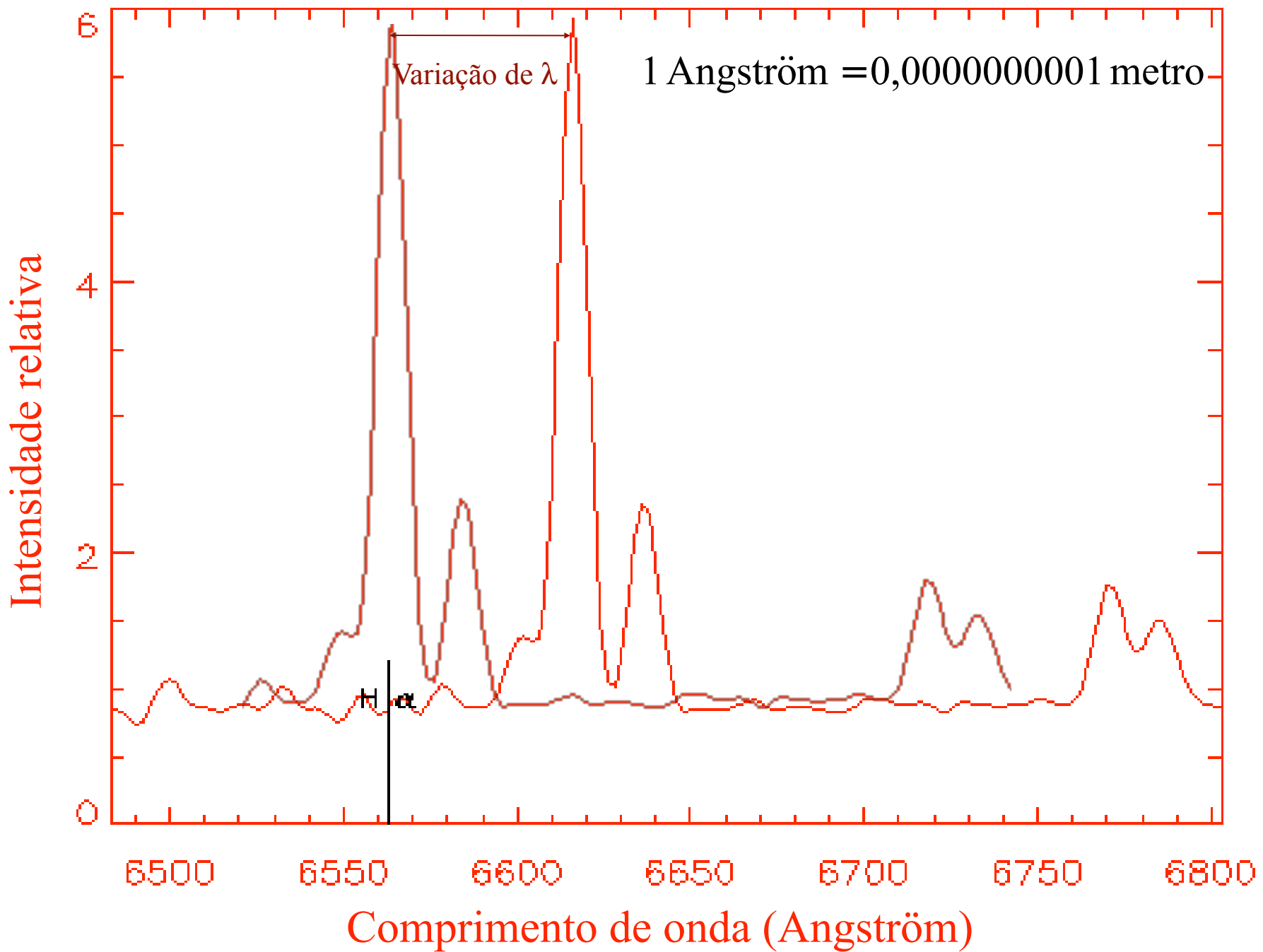
NGC 2276

NGC 2276 – Hidrogênio α (6562.8Å)

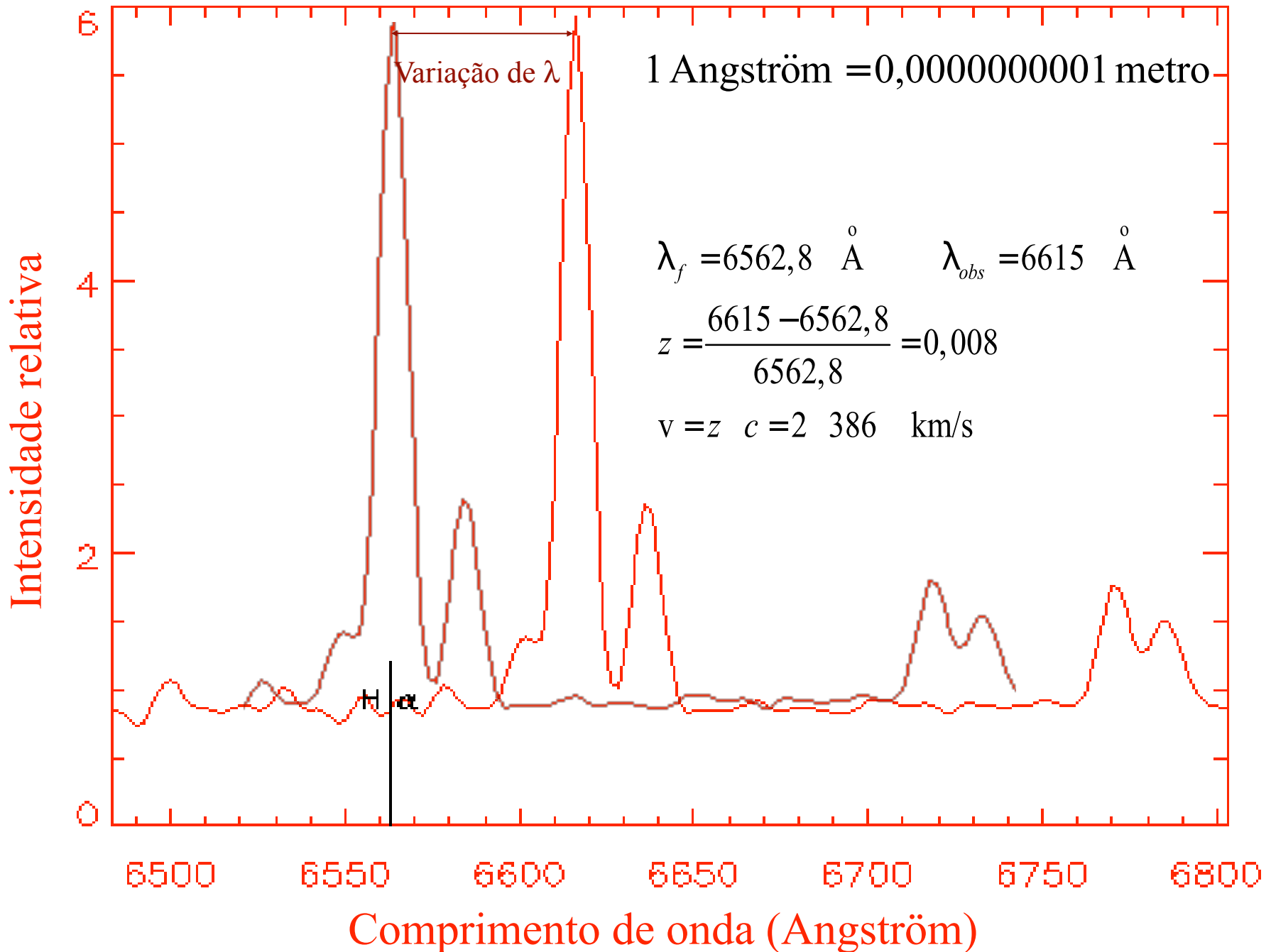
1 Angström = 0,000000001 metro



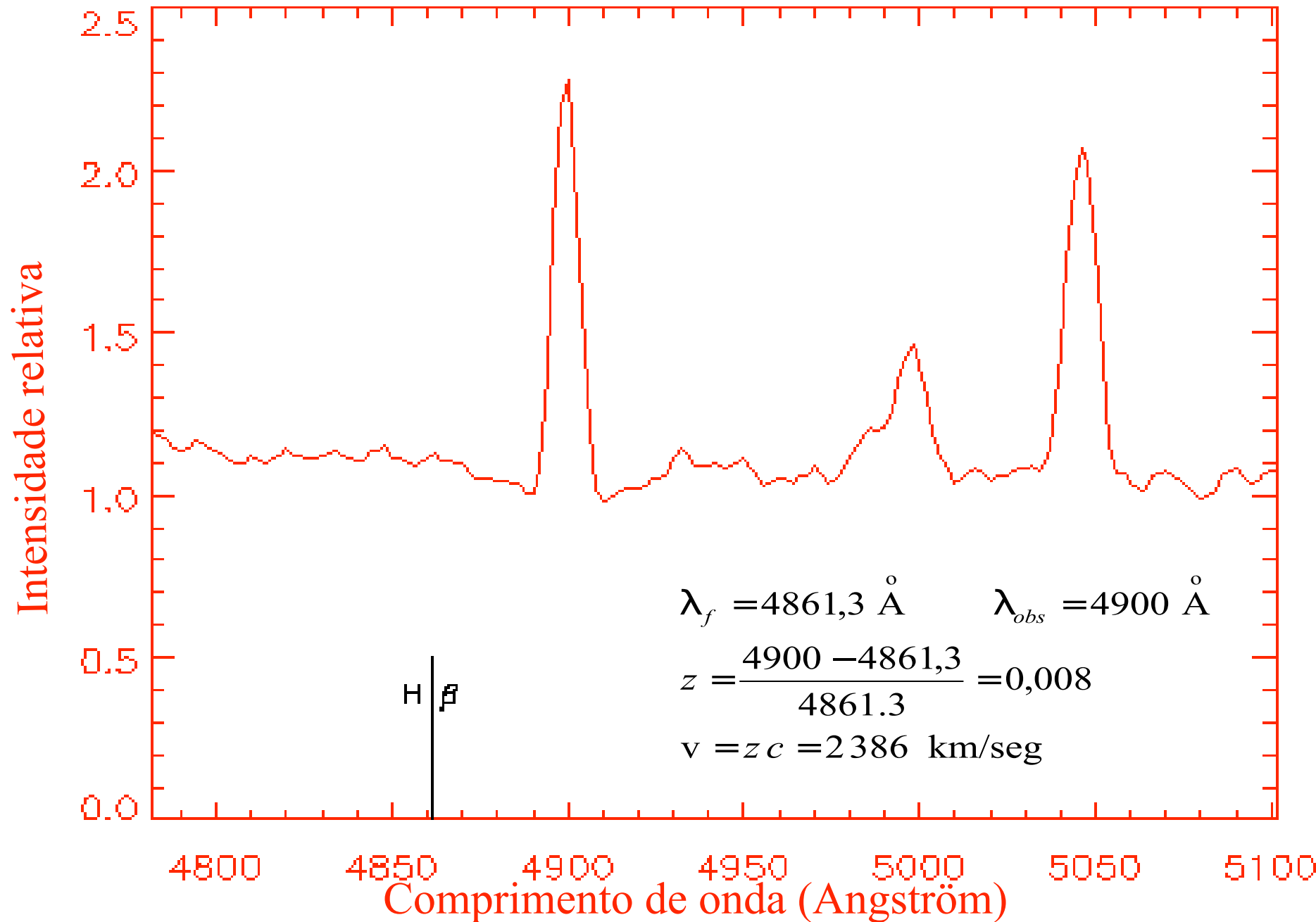
NGC 2276 – Hidrogênio α (6562.8Å)



NGC 2276 – Hidrogênio α (6562.8Å)



NGC 2276 – Hidrogênio β (4861.3Å)



A expansão do Universo e a lei de Hubble



V. M. Slipher

- A velocidade de Andrômeda estimada por Slipher foi de, aproximadamente, 300km/seg.
- Em 1915 ele já tinha 40 medidas de espectro de nebulosas com 15 velocidades estimadas, número que sobe para 25 em 1917.
- Contrariamente ao que fora observado em Andrômeda a grande maioria apresentava velocidades positivas. Por exemplo, das 41 nebulosas com desvio para o vermelho medido em 1923, apenas 5 (incluindo Andrômeda) aproximavam-se de nós.

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica

142 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 8. Februar 1917

Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poisson'sche Differentialgleichung

$$\Delta \phi = 4\pi K \rho \quad (1)$$

in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die Newton'sche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential ϕ einem festen Grenzwerte zustrebt. Analog verhält es sich bei der Gravitationstheorie der allgemeinen Relativität; auch hier müssen zu den Differentialgleichungen Grenzbedingungen hinzutreten für das räumlich Unendliche, falls man die Welt wirklich als räumlich unendlich ausgedehnt anzusehen hat.

Bei der Behandlung des Planetenproblems habe ich diese Grenzbedingungen in Gestalt folgender Annahme gewählt: Es ist möglich, ein Bezugssystem so zu wählen, daß sämtliche Gravitationspotentiale $g_{\alpha\beta}$ im räumlich Unendlichen konstant werden. Es ist aber a priori durchaus nicht evident, daß man dieselben Grenzbedingungen ansetzen darf, wenn man größere Partien der Körperwelt ins Auge fassen will. Im folgenden sollen die Überlegungen angegeben werden, welche ich bisher über diese prinzipiell wichtige Frage angestellt habe.

§ 1. Die Newton'sche Theorie.

Es ist wohlbekannt, daß die Newton'sche Grenzbedingung des konstanten Limes für ϕ im räumlich Unendlichen zu der Auffassung hin- führt, daß die Dichte der Materie im Unendlichen zu null wird. Wir denken uns nämlich, es lasse sich ein Ort im Weltraum finden, um den herum das Gravitationsfeld der Materie, im großen betrachtet, Kugelsymmetrie besitzt (Mittelpunkt). Dann folgt aus der Poisson'schen Gleichung, daß die mittlere Dichte ρ rascher als $\frac{1}{r^2}$ mit wachsender Entfernung r vom Mittelpunkt zu null herabsinken muß, damit ϕ im

- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**
- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva (finito) e **estático.**

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**
- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva (finito) e **estático.**
- constante cosmológica (Λ)

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**
- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva (finito) e **estático.**
- constante cosmológica (Λ)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**
- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva (finito) e **estático.**
- constante cosmológica (Λ)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = - 8\pi G T_{\mu\nu}$$

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica

- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**

$$\Lambda = 4\pi G\rho = R_U^{-2}$$

$$V = 2\pi^2 R_U^3$$

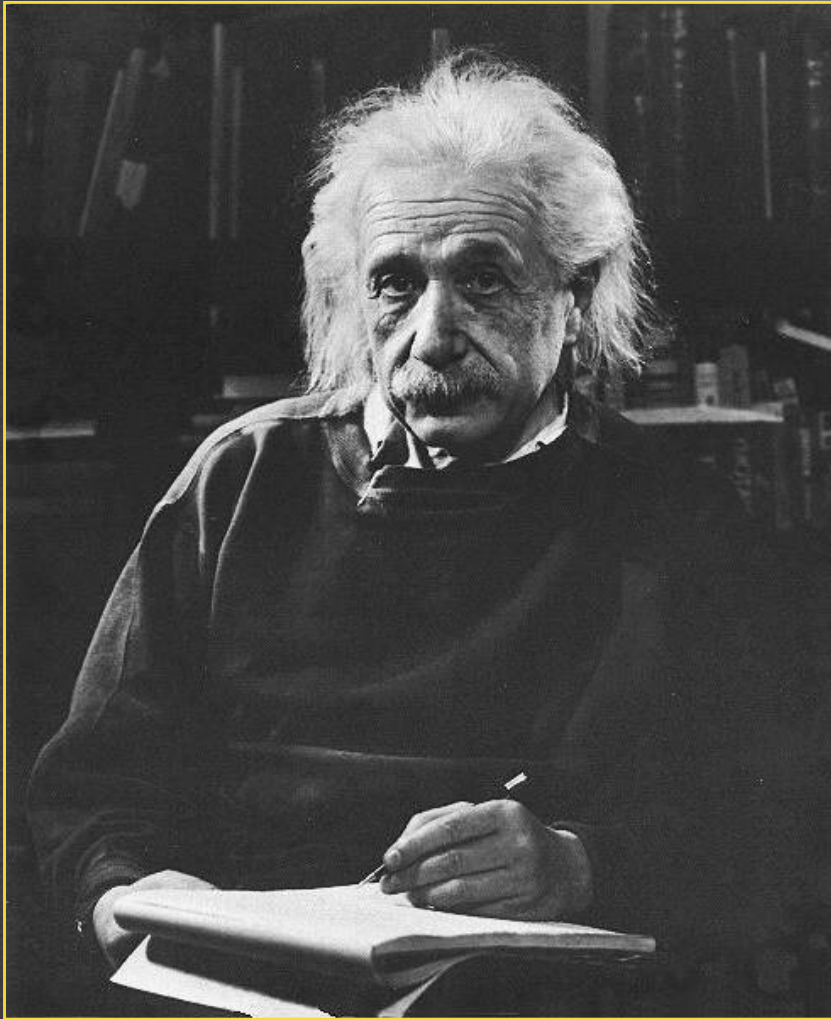
$$M = 2\pi^2 \rho R_U^3 = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{\rho} \right)^{1/2}$$

- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva (finito) e **estático.**
- constante cosmológica (Λ)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

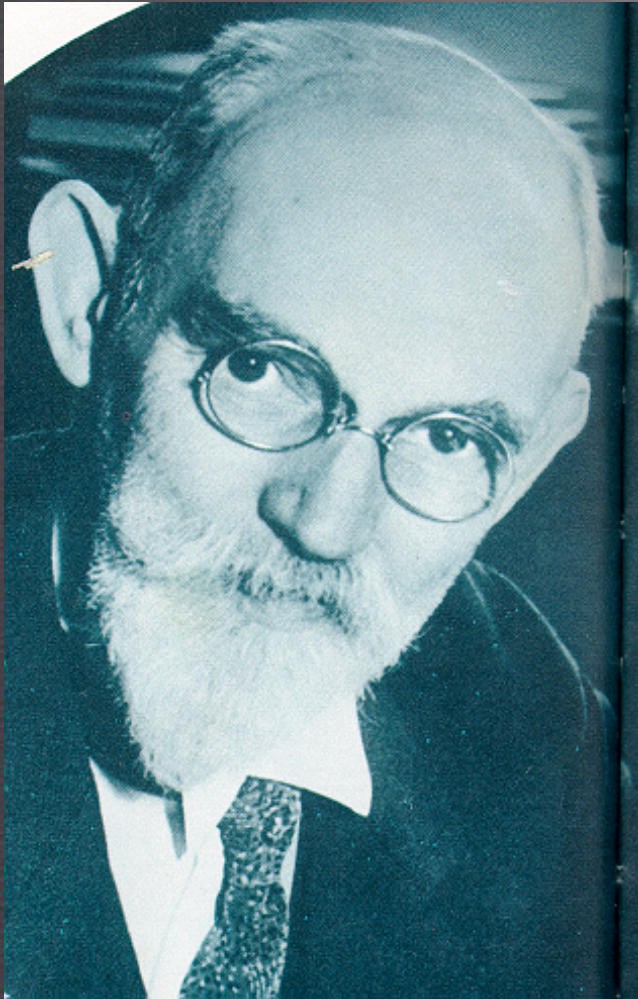
O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica

Einstein considerava que seu modelo possuía as seguintes virtudes:



- ✓ Era possível construir um modelo consistente para o universo usando a relatividade geral.
- ✓ Relaciona Λ com a densidade média da matéria; Estava em acordo com o princípio de Mach que relaciona a inércia (propriedade local) com a distribuição de matéria no cosmos.
- ✓ Einstein acreditava ser esse o único modelo admitido pela relatividade geral que era estático e que estava em acordo com o princípio de Mach.

Modelo de de Sitter



Willem de Sitter

- Em 1917 de Sitter obtêm novas soluções da Relatividade Geral com constante cosmológica, estáticas, mas vazias !
- “The lines in the spectra of very distant stars or nebulae must therefore be systematically displaced towards the red, giving rise to a **spurious** positive radial velocity.”

A RELAÇÃO VELOCIDADE X DISTÂNCIA



CARL W. WIRTZ

- 1922 - **Carl Wilhelm Wirtz** busca uma relação entre distância e velocidade de nebulosas.
- diâmetro aparente de nebulosas como indicador de distância.
- velocidade cresce com a distância.

A RELAÇÃO VELOCIDADE X DISTÂNCIA



CARL W. WIRTZ

- 1922 - **Carl Wilhelm Wirtz** busca uma relação entre distância e velocidade de nebulosas.
- diâmetro aparente de nebulosas como indicador de distância.
- velocidade cresce com a distância.

— Estudos semelhante foram realizados por **Gustaf Stromberg** e **Knut Lundmark**



KNUT LUNDMARK



GUSTAF STROMBERG

	$v \times d$
Wirtz	$v = \alpha - \beta \log D_m$
Lundmark	$v = k + lr + mr^2$
Stromberg	nada conclusivo

A RELAÇÃO VELOCIDADE

DISTÂNCIA



CARL W. WIRTZ

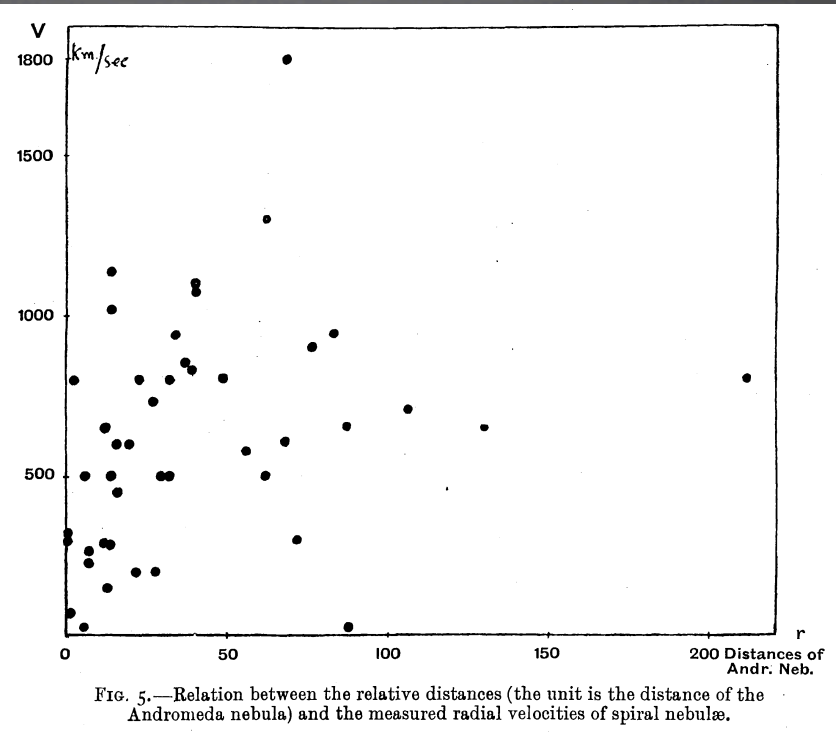


FIG. 5.—Relation between the relative distances (the unit is the distance of the Andromeda nebula) and the measured radial velocities of spiral nebulae.

Estudos semelhantes foram realizados por **Gustaf Stromberg** e **Knut Lundmark**



KNUT LUNDMARK



GUSTAF STROMBERG

	$v \times d$
Wirtz	$v = \alpha - \beta \log D_m$
Lundmark	$v = k + lr + mr^2$
Stromberg	nada conclusivo

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



A. A. FRIEDMANN

- 1922 - Aleksander Aleksandrovich Friedmann obtem soluções expansionistas, sem Λ e com matéria das equações de Einstein.
- O modelo de Friedmann é considerado hoje o modelo padrão da cosmologia.
- Características principais: homogeneidade espacial, isotropia (em relação a qualquer ponto) e expansão.

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO

General Relativity and Gravitation, Vol. 31, No. 12, 1999

† Originally published in *Zeitschrift für Physik* **10**, 377-386 (1922), with the title “Über die Krümmung des Raumes”. Both papers are printed with the kind permission of Springer-Verlag GmbH & Co. KG, the current copyright owner, and translated by G. F. R. Ellis and H. van Elst, Department of Mathematics and Applied Mathematics, University of Cape Town, Rondebosch 7701, South Africa. Some obvious typos have been corrected in this translation.

On the Curvature of Space†

By A. Friedman in Petersburg *

With one figure. Received on 29. June 1922

§1. 1. In their well-known works on general cosmological questions, Einstein¹ and de Sitter² arrive at two possible types of the universe; Einstein obtains the so-called cylindrical world, in which space³ has constant, time-independent curvature, where the curvature radius is connected to the total mass of matter present in space; de Sitter obtains a spherical world in which not only space, but in a certain sense also the world can be addressed as a world of constant curvature.⁴ In doing so both Einstein and de Sitter make certain presuppositions about the matter tensor, which correspond to the incoherence of matter and its relative rest, i.e. the velocity of matter will be supposed to be sufficiently small in comparison to the fundamental velocity⁵ — the velocity of light.

The goal of this Notice is, firstly the derivation of the cylindrical and spherical worlds (as special cases) from some general assumptions, and secondly the proof of the possibility of a world whose space curvature is constant with respect to three coordinates that serve as space coordinates, and dependent on the time, i.e. on the fourth — the time coordinate; this new type is, as concerning its other properties, an analogue of the Einstein cylindrical world.

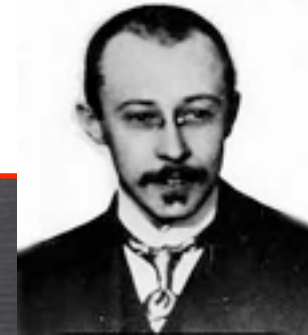
General Relativity and Gravitation, Vol. 31, No. 12, 1999

Originally published in *Zeitschrift für Physik* **21**, 326-332 (1924), with the title “Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes”. See footnote to the first paper’s title.

On the Possibility of a World with Constant Negative Curvature of Space†

By A. Friedmann in Petersburg *

Received on 7. January 1924

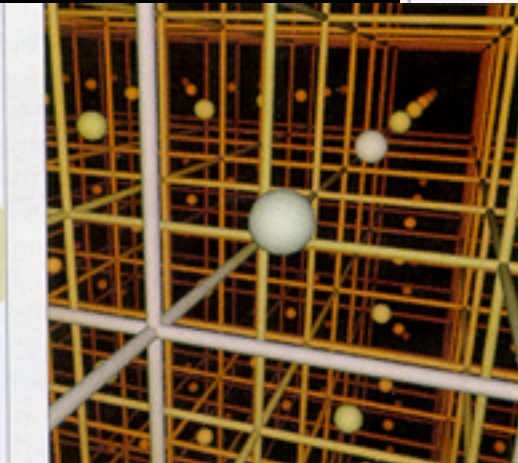
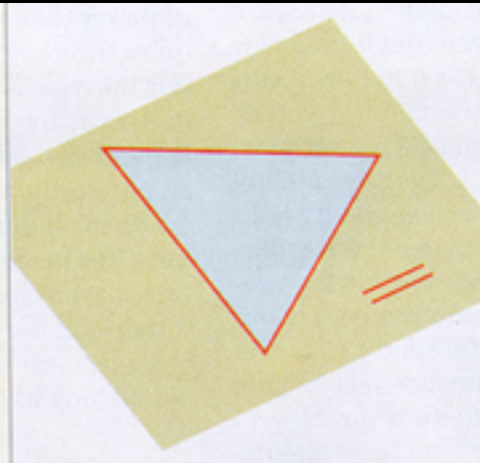
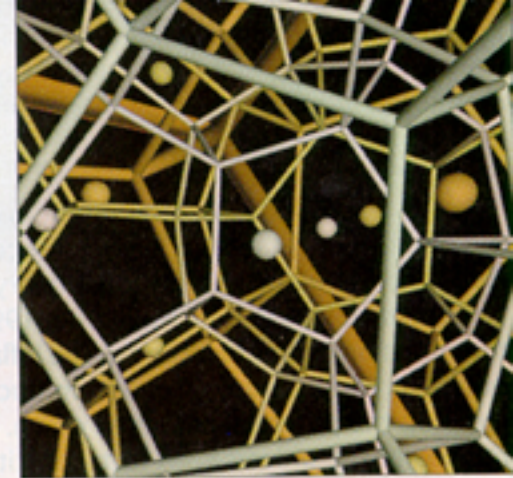
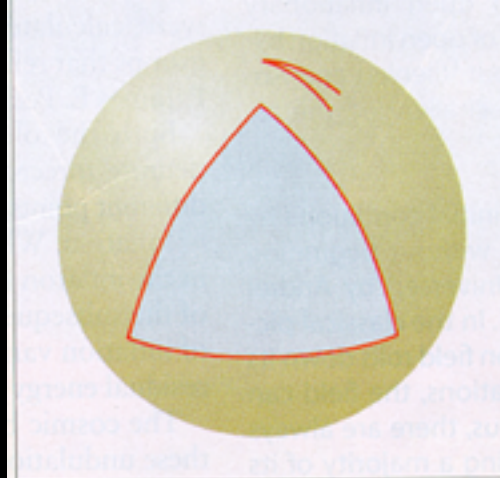


A. A. FRIEDMANN

7. Our knowledge is completely insufficient to carry out numerical calculations and to decide, which world our universe is; it is possible that the causality problem and the problem of the centrifugal force will illuminate these questions. It is left to remark that the “cosmological” quantity λ remains undetermined in our formulae, since it is an extra constant in the problem; possibly electrodynamical considerations can lead to its evaluation. If we set $\lambda = 0$ and $M = 5.10^{21}$ solar masses, then the world period becomes of the order of 10 billion years. But these figures can surely only serve as an illustration for our calculations.

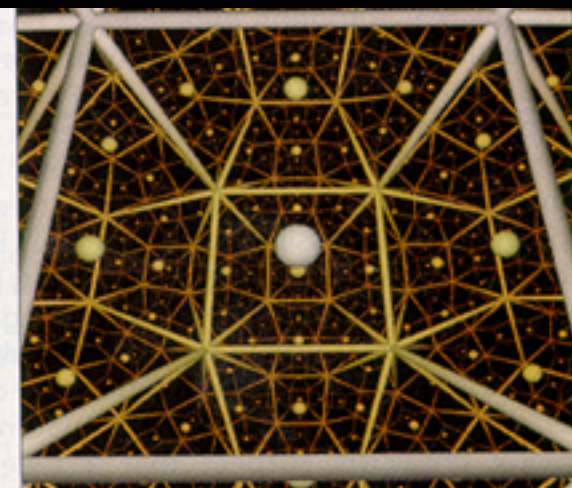
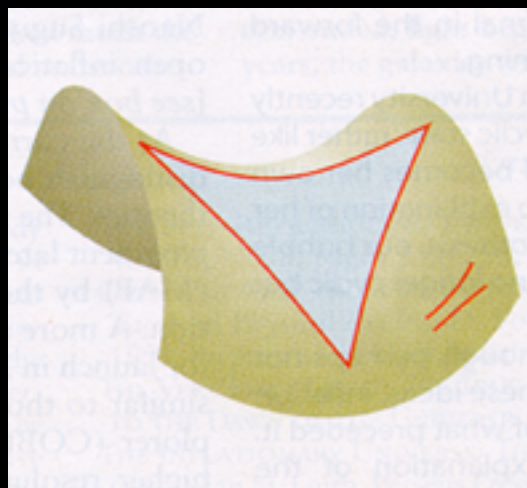
Petrograd, 29. May 1922.

Curvatura espacial positiva



Curvatura espacial nula

Curvatura espacial negativa



REMARK ON THE WORK OF A. FRIEDMANN (FRIEDMANN 1922)
"ON THE CURVATURE OF SPACE"

A. Einstein
Berlin

Received September 18, 1922

The work cited contains a result concerning a non-stationary world which seems suspect to me. Indeed, those solutions do not appear compatible with the field equations (A). From the field equations it follows necessarily that the divergence of the matter tensor T_{ik} vanishes. This along with the anzatzes (C) and (D) leads to the condition

$$\partial\rho/\partial x_4 = 0$$

which together with (8) implies that the world-radius R is constant in time. The significance of the work therefore is to demonstrate this constancy.

REFERENCES

Friedmann, A. 1922, Zs. f. Phys., 10, 377.

REMARK ON THE WORK OF A. FRIEDMANN (FRIEDMANN 1922)
"ON THE CURVATURE OF SPACE"

A. Einstein
Berlin

A NOTE ON THE WORK OF A. FRIEDMANN
"ON THE CURVATURE OF SPACE"

A. Einstein
Berlin

Received May 31, 1923

The
tionary
tions do
From the
vergence
the anzatz

which toget
constant in
to demonstra

I have in an earlier note (Einstein 1922) criticized the cited work (Friedmann 1922). My objection rested however - as Mr. Krutkoff in person and a letter from Mr. Friedmann convinced me - on a calculational error. I am convinced that Mr. Friedmann's results are both correct and clarifying. They show that in addition to the static solutions to the field equations there are time varying solutions with a spatially symmetric structure.

REFERENCES

- Friedmann, A. Einstein, A. 1922, Zs. f. Phys., 11, 326.
Friedmann, A. 1922, Ebenda, 10, 377.

REMARK ON THE WORK OF A. FRIEDMANN (FRIEDMANN 1922)
"ON THE CURVATURE OF

A. Einstein
Berlin

A NOTE
"O

The
tionary
tions do
From the
vergence
the anzatz

which toget
constant in
to demonstra

I have in an ea
cited work (Friedmann
Mr. Krutkoff in pers
vinced me - on a calc
Friedmann's results
show that in additio
equations there are
symmetric structure.

Friedmann, A. Einstein, A. 1922, Zs.
Friedmann, A. 1922, Ebe

Notiz zu der Arbeit von A. Friedmann
"Über die Krümmung des Raumes"

Ich habe in einer früheren Notiz^x an
den genannten Arbeit^{xx} Kritik geübt.
Mein Einwand betraf aber - wie

sich nicht auf Anregung von Herrn
Krutkoff^{an Hand eines Briefes von Herrn Friedmann} überzeugt habe - auf einen
Rechenfehler. Ich halte Herrn Krutkoffs
Resultate für richtig und interessant aufklärend.

Es zeigt sich, dass die Feldgleichungen
dynam neben den statischen dynamische
(d. h. mit der Zeitkoordinate variablen)
Lösungen ^{für die Raumstruktur} zulassen, denen eine physikalische
Bedeutung kaum zuzuschreiben sein
dürfte.

A. Einstein.

^x Ztschr. für Physik 1922 11.B. S 326

^{xx} Ztschr. für Physik 1922 10.B. S 322.

A. Einstein Archive
1-026

"denem eine physikalische Bedeutung kaum zuzuschreiben sein dürfte"

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître

■ Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître

■ **Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.**

■ **1911 - entra para o curso de engenharia (Universidade Católica de Louvain).**

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.



LEMAÎTRE

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.



LEMAÎTRE

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.
- 1925 aceita uma posição na Universidade de Louvain (part-time lecturer).

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.
- 1925 aceita uma posição na Universidade de Louvain (part-time lecturer).
- 1926 conclui a sua tese de doutorado (MIT) (*The gravitational field in a fluid sphere of uniform invariant density according to the theory of relativity*) sob a orientação de Shapley.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.
- 1925 aceita uma posição na Universidade de Louvain (part-time lecturer).
- 1926 conclui a sua tese de doutorado (MIT) (*The gravitational field in a fluid sphere of uniform invariant density according to the theory of relativity*) sob a orientação de Shapley.
- O trabalho de pesquisa realizado em Harvard, MIT e na Universidade de Louvain é publicado no *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* em 1927. **Esse é um trabalho chave!**

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.
- 1925 aceita uma posição na Universidade de Louvain (part-time lecturer).
- 1926 conclui a sua tese de doutorado (MIT) (*The gravitational field in a fluid sphere of uniform invariant density according to the theory of relativity*) sob a orientação de Shapley.
- O trabalho de pesquisa realizado em Harvard, MIT e na Universidade de Louvain é publicado no *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* em 1927. **Esse é um trabalho chave!**
- Em 1927 participa do SOLVAY CONFERENCE onde encontra com Einstein e lhe fala sobre o seu trabalho. Einstein informa-o sobre o trabalho de Friedmann de 1922.

Georges Henri-Joseph-Edouard Lemaître



LEMAÎTRE

- Lemaître (1894 - 1966) Charleroi, Bélgica.
- 1911 - entra para o curso de Engenharia (Universidade Católica de Louvain).
- 1914 - alista-se e torna-se oficial de artilharia do exército belga.
- 1919 - retorna à Universidade de Louvain para estudar Física e Matemática. Gradua-se como Doutor em Ciências em 1920.
- 1920 inicia estudos em teologia e em 1923 é ordenado padre.
- 1923 - 1924 - vai para Cambridge estudar sob orientação de Eddington.
- 1924 segue para os EUA, trabalhando e estudando no Harvard College Observatory em Massachusetts e no MIT.
- 1925 aceita uma posição na Universidade de Louvain (part-time lecturer).
- 1926 conclui a sua tese de doutorado (MIT) (*The gravitational field in a fluid sphere of uniform invariant density according to the theory of relativity*) sob a orientação de Shapley.
- O trabalho de pesquisa realizado em Harvard, MIT e na Universidade de Louvain é publicado no *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* em 1927. **Esse é um trabalho chave!**
- Em 1927 participa do SOLVAY CONFERENCE onde encontra com Einstein e lhe fala sobre o seu trabalho. Einstein informa-o sobre o trabalho de Friedmann de 1922.
- **“Your calculation are correct, but your grasp of physics is abominable”.**

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



LEMAÎTRE & EINSTEIN

Questão Central - Como modelos cosmológicos poderiam explicar o desvio para o vermelho observado em nebulosas?

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



ANNALES DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE
DE BRUXELLES, XLVII (1927), 49-56

- 49 -

UN UNIVERS HOMOGENÈME DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT, RENDANT COMPTE DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de courbure positive uniforme $1/R^2$, les droites issues d'un même point repassent à leur point de départ après un parcours égal à πR , le volume total de l'espace est fini et égal à $\pi^2 R^3$, les droites sont des lignes fermées parcourant tout l'espace sans rencontrer de frontière (1).

Deux solutions ont été proposées. Celle de DE SITTER ignore la présence de la matière et suppose sa densité nulle. Elle conduit à certaines difficultés d'interprétation sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, mais son grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extra-galactiques semblent nous fuir avec une énorme vitesse, comme une simple conséquence des propriétés du champ de gravitation, sans supposer que nous nous trouvons en un point de l'univers doué de propriétés spéciales.

LEMAÎTRE & EINSTEIN

Questão Central - Como modelos cosmológicos poderiam explicar o desvio para o vermelho observado em nebulosas?

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



ANNALES DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE
DE BRUXELLES, XLVII (1927), 49-56

- 49 -

UN UNIVERS HOMOGENÈ DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT, RENDANT COMPTE DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de courbure positive uniforme $1/R^2$, les droites issues d'un même point repassent à leur point de départ après un parcours égal à πR , le volume total de l'espace est fini et égal à $\pi^2 R^3$, les droites sont des lignes fermées parcourant tout l'espace sans rencontrer de frontière (¹).

Deux solutions ont été proposées. Celle de DE SITTER ignore la présence de la matière et suppose sa densité nulle. Elle conduit à certaines difficultés d'interprétation sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, mais son grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extra-galactiques semblent nous fuir avec une énorme vitesse, comme une simple conséquence des propriétés du champ de gravitation, sans supposer que nous nous trouvons en un point de l'univers doué de propriétés spéciales.

LEMAÎTRE & EINSTEIN

Questão Central - Como modelos cosmológicos poderiam explicar o desvio para o vermelho observado em nebulosas?

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg (¹), et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction $\alpha = 315^\circ$, $\delta = 62^\circ$), on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 Km./sec, soit 625 Km./sec à 10^6 parsecs (²).

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

DESCOBRINDO A EXPANSÃO DO UNIVERSO



ANNALES DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE
DE BRUXELLES, XLVII (1927), 49-56

- 49 -

UN UNIVERS HOMOGENÈ DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de courbure positive uniforme $1/R^2$, les droites issues d'un même point repassent à leur point de départ après un parcours égal à πR , le volume total de l'espace est fini et égal à $\pi^2 R^3$, les droites sont des lignes fermées parcourant tout l'espace sans rencontrer de frontière (¹).

Deux solutions ont été proposées. Celle de DE SITTER ignore la présence de la matière et suppose sa densité nulle. Elle conduit à certaines difficultés d'interprétation sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, mais son grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extra-galactiques semblent nous fuir avec une énorme vitesse, comme une simple conséquence des propriétés du champ de gravitation, sans supposer que nous nous trouvons en un point de l'univers doué de propriétés spéciales.

LEMAÎTRE & EINSTEIN

Questão Central - Como modelos cosmológicos poderiam explicar o desvio para o vermelho observado em nebulosas?

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg (¹), et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction $\alpha = 315^\circ$, $\delta = 62^\circ$), on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 Km./sec, soit 625 Km./sec à 10^6 parsecs (²).

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

DISCOVERY OF THE EXPANSION OF THE UNIVERSE

arXiv:1108.0709

Sidney van den Bergh

Dominion Astrophysical Observatory, Herzberg Institute of Astrophysics, National Research Council of Canada, 5071 West Saanich Road, Victoria, British Columbia, V9E 2E7, Canada,

sidney.vandenbergh@nrc.ca

Sidney van den Bergh

Dominion Astrophysical Observatory, Herzberg Institute of Astrophysics, National Research Council of Canada, 5071 West Saanich Road, Victoria, British Columbia, V9E 2E7, Canada, sidney.vandenbergh@nrc.ca

<http://www.aip.org/history/ohilist/4686.html>

Interview with Dr. Milton Humason
By Bert Shapiro
Circa 1965



Transcript

Humason:

The velocity-distance relationship started after one of the IAU meetings, I think it was held in Holland. And Dr. Hubble came home rather excited about the fact that two or three scientists over there, astronomers, had suggested that the fainter the nebulae were the more distant they were and the larger the red shifts would be. And he talked to me and asked me if I would try and check that out. Well, our trouble was that our spectrographs were extremely slow -- that was back in about 1927 or '28. We had prisms in the spectrographs then and they were made of, a lot of them, of yellow glass which didn't let the ultra-violet light through and the exposures were extremely long. I agreed to try one exposure, and as I remember it lasted over a period of about two nights. I exposed the plate for two nights and got one of the

Sidney van den Bergh

Dominion Astrophysical Observatory, Herzberg Institute of Astrophysics, National Research Council of Canada, 5071 West Saanich Road, Victoria, British Columbia, V9E 2E7, Canada, sidney.vandenbergh@nrc.ca

<http://www.aip.org/history/ohilist/4686.html>

Interview with Dr. Milton Humason
By Bert Shapiro
Circa 1965



Transcript

Humason:

The velocity-distance relationship started after one of the IAU meetings, I think it was held in Holland. And Dr. Hubble came home rather excited about the fact that two or three scientists over there, astronomers, had suggested that the fainter the nebulae were the more distant they were and the larger the red shifts would be. And he talked to me and asked me if I would try and check that out. Well, our trouble was that our spectrographs were extremely slow -- that was back in about 1927 or '28. We had prisms in the spectrographs then and they were made of, a lot of them, of yellow glass which didn't let the ultra-violet light through and the exposures were extremely long. I agreed to try one exposure, and as I remember it lasted over a period of about two nights. I exposed the plate for two nights and got one of the

Among the astronomers present at the IAU meeting, who might have been interested in a possible velocity-distance relationship for galaxies, were de Sitter, Hubble, Lemaître, Lundmark, Shapley and Smart.

A LEI DE HUBBLE

*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

From the Proceedings of the National Academy of Sciences
Volume 15 : March 15, 1929 : Number 3



HUBBLE

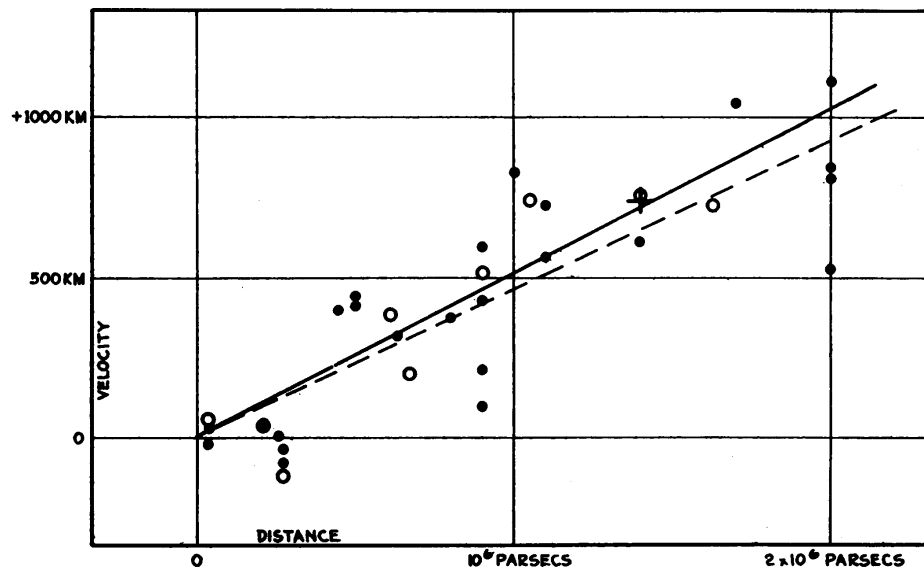


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

A LEI DE HUBBLE

$$v = cz = H_0 d$$

From the Proceedings of the National Academy of Sciences
Volume 15 : March 15, 1929 : Number 3



HUBBLE

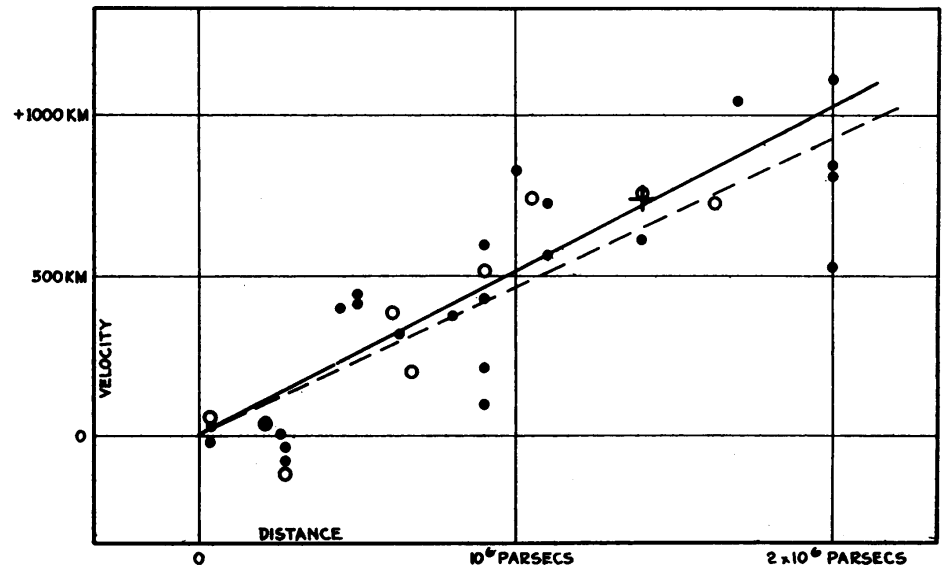


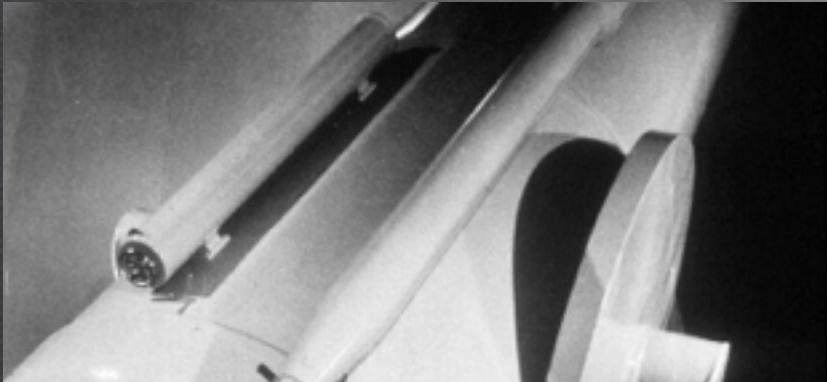
FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

A LEI DE HUBBLE

$$v = cz = H_0 d$$

From the Proceedings of the National Academy of Sciences
Volume 15 : March 15, 1929 : Number 3



The outstanding feature, however, is the possibility that the velocity-distance relation may represent the de Sitter effect, and hence that numerical data may be introduced into discussions of the general curvature of space. In the de Sitter cosmology, displacements of the spectra arise from two sources, an apparent slowing down of atomic vibrations and a general tendency of material particles to scatter. The latter involves an acceleration and hence introduces the element of time. The relative importance of these two effects should determine the form of the relation between distances and observed velocities; and in this connection it may be emphasized that the linear relation found in the present discussion is a first approximation representing a restricted range in distance.

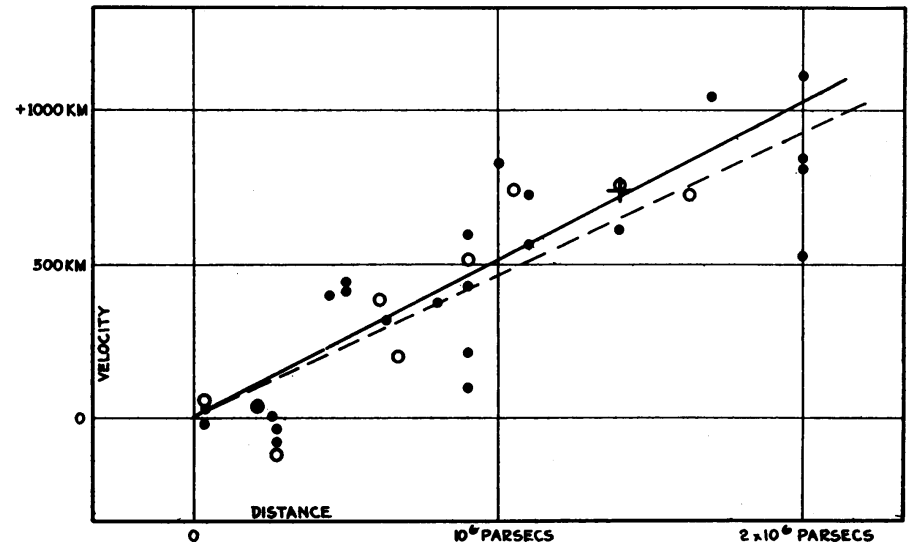
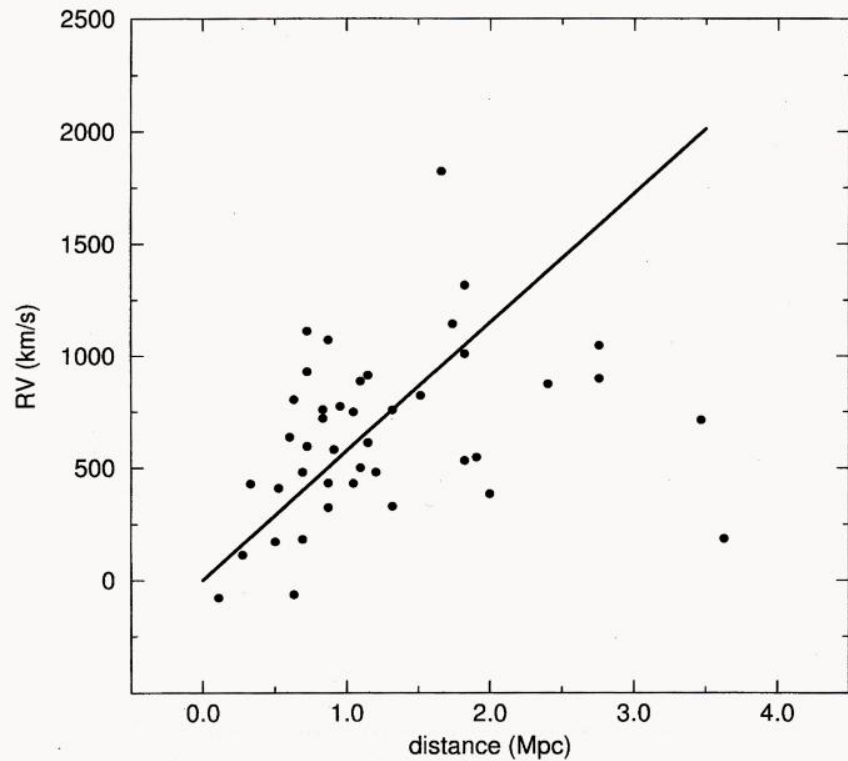


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Figure 1 Left hand panel: The data used by Lemaître (1927) to yield the first empirical value of the rate of expansion of the Universe (625 km/s/Mpc), now known as the 'Hubble' constant. The diagram is reconstructed by H. Duerbeck and is used with permission. Right hand panel: The radial velocity –distance diagram published by Hubble, two years later, in 1929, with a "best slope" of 530 km/s/Mpc.

"A HUBBLE ECLIPSE: LEMAÎTRE AND CENSORSHIP"
DAVID L. BLOCK ; ARXIV/1106.3928

CARTA DE LEMAÎTRE À EDDINGTON
 (03/1930) APÓS O ENCONTRO DA
 ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY
 EM 01/1930.



Arthur Stanley Eddington

Dear Professor Eddington

I just read the February No of the Observatory and the discussion on your suggestion of the investigating the intermediate non statistical intermediate solution between ^{the} of Einstein and de Sitter.

I made then investigation two years ago. I consider an universe of curvature constant in space but ^{increasing} variable with time. And I looked for the existence of a solution for which the ~~space~~ ^{retreating} motion of the nebulae ~~was~~ ^{is} always ~~from~~ ^{from} a residual one ~~from~~ ^{from} time ~~to~~ ^{to} ~~infinity~~ ^{infinity} and from time minus infinity to ~~infinity~~ ^{infinity}.

This solved the question put forward by de Sitter why the nebulae are on the receding branch of the hyperbola.

The result is a fellow.

~~It is the~~ the receding motion of the nebulae is a measure of the initial or now assumed radius for $t = -\infty$. by the formula

$$R_0 \approx \frac{2c}{\sqrt{3}}$$

which $\frac{v}{2c} = \frac{1}{3R_0^2} + \frac{1}{R^2} - \frac{2}{3R_E^2}$

[see later the work]

A LEI DE HUBBLE

$$v = cz = H_0 d$$

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION AMONG
EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

By EDWIN HUBBLE AND MILTON L. HUMASON



Milton Humason e Hubble

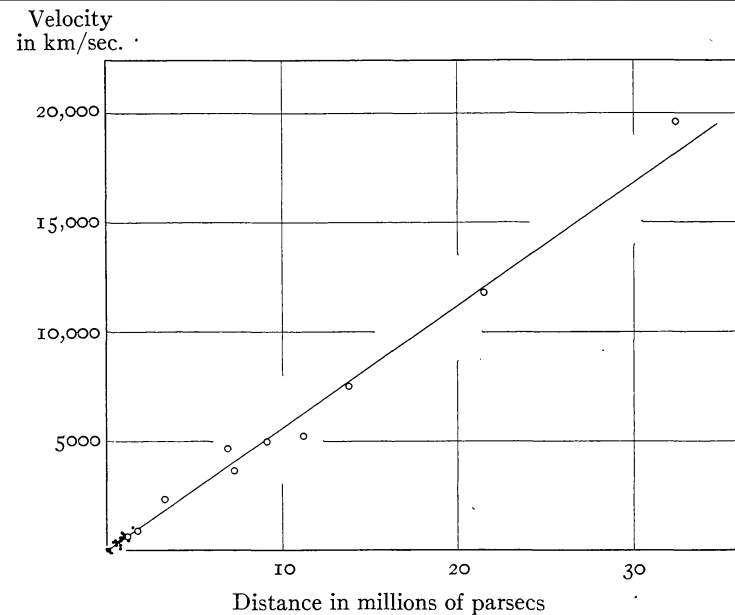
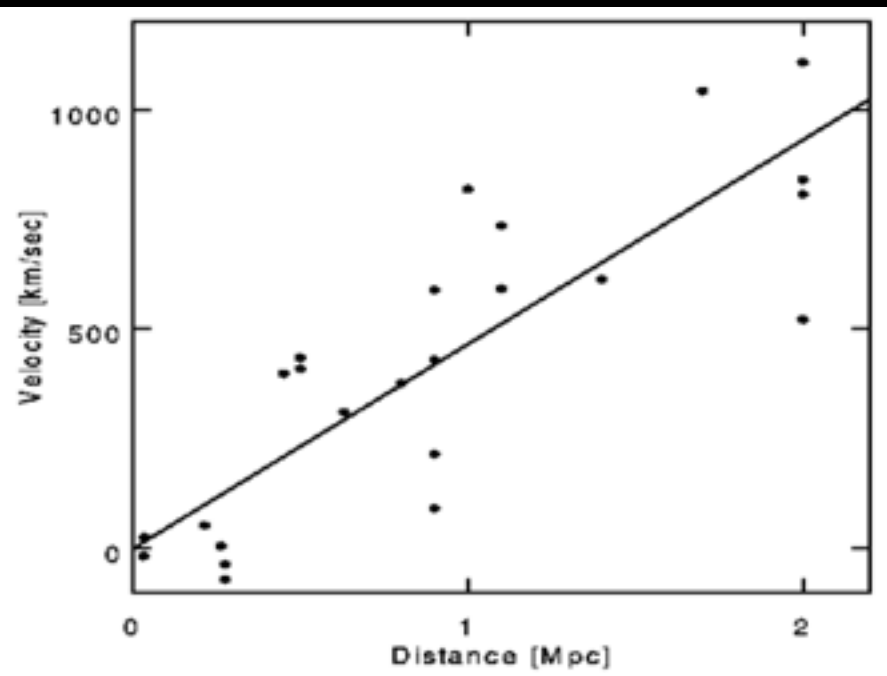


FIG. 5.—The velocity-distance relation. The circles represent mean values for clusters or groups of nebulae. The dots near the origin represent individual nebulae, which, together with the groups indicated by the lowest two circles, were used in the first formulation of the velocity-distance relation.

A lei de Hubble.

velocidade
de recessão $= H \times \text{distância}$



[Hubble (1929)]

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE¹

BY EDWIN HUBBLE AND MILTON L. HUMASON

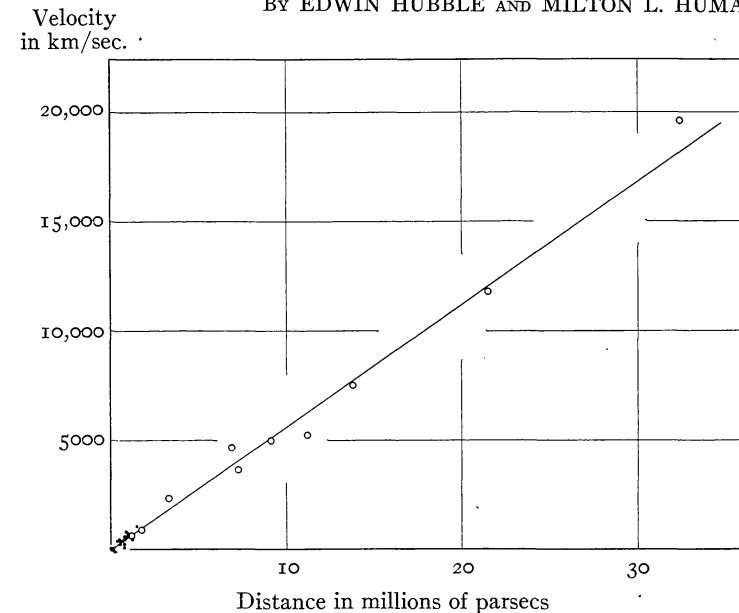


FIG. 5.—The velocity-distance relation. The circles represent mean values for clusters or groups of nebulae. The dots near the origin represent individual nebulae, which, together with the groups indicated by the lowest two circles, were used in the first formulation of the velocity-distance relation.

Algumas Questões

- Para onde estão as galáxias se expandindo?
- Onde está o centro do "Big-Bang"?
- O sistema solar está em expansão?
- A velocidade com que o Universo está se expandindo aumenta, diminui ou permanece constante?
- irá o Universo expandir-se para sempre ou haverá no futuro uma contração?

Para onde estão as galáxias se expandindo?

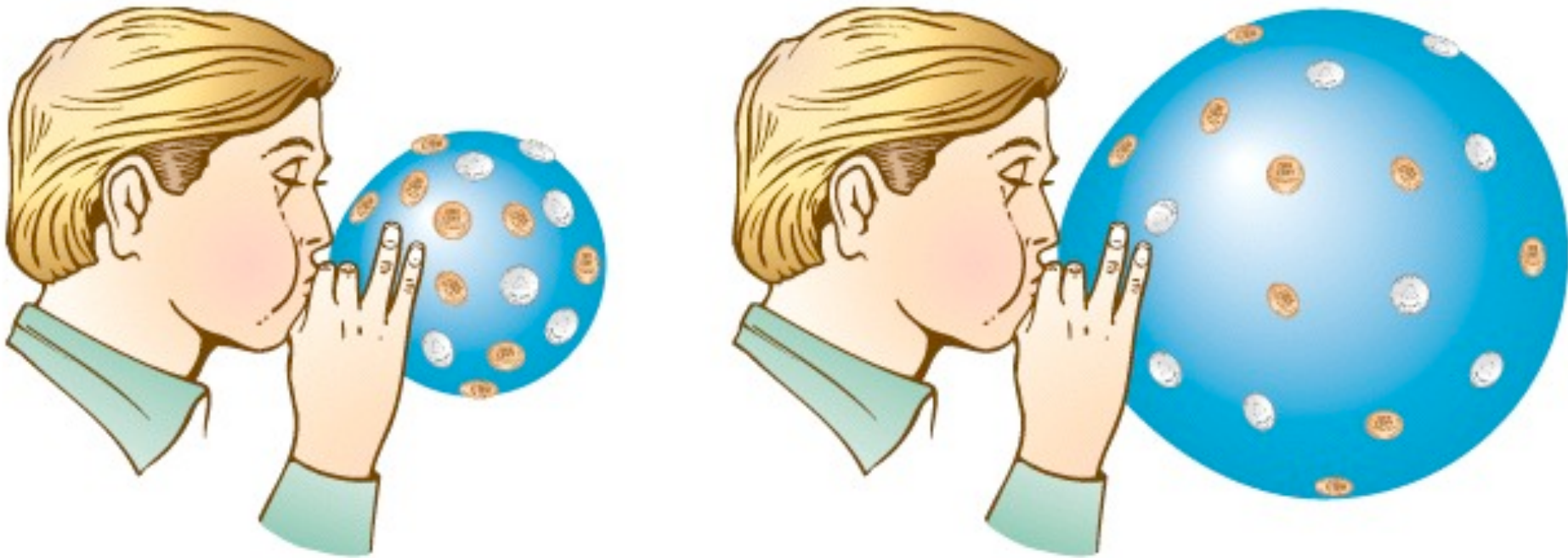
Não



Sim

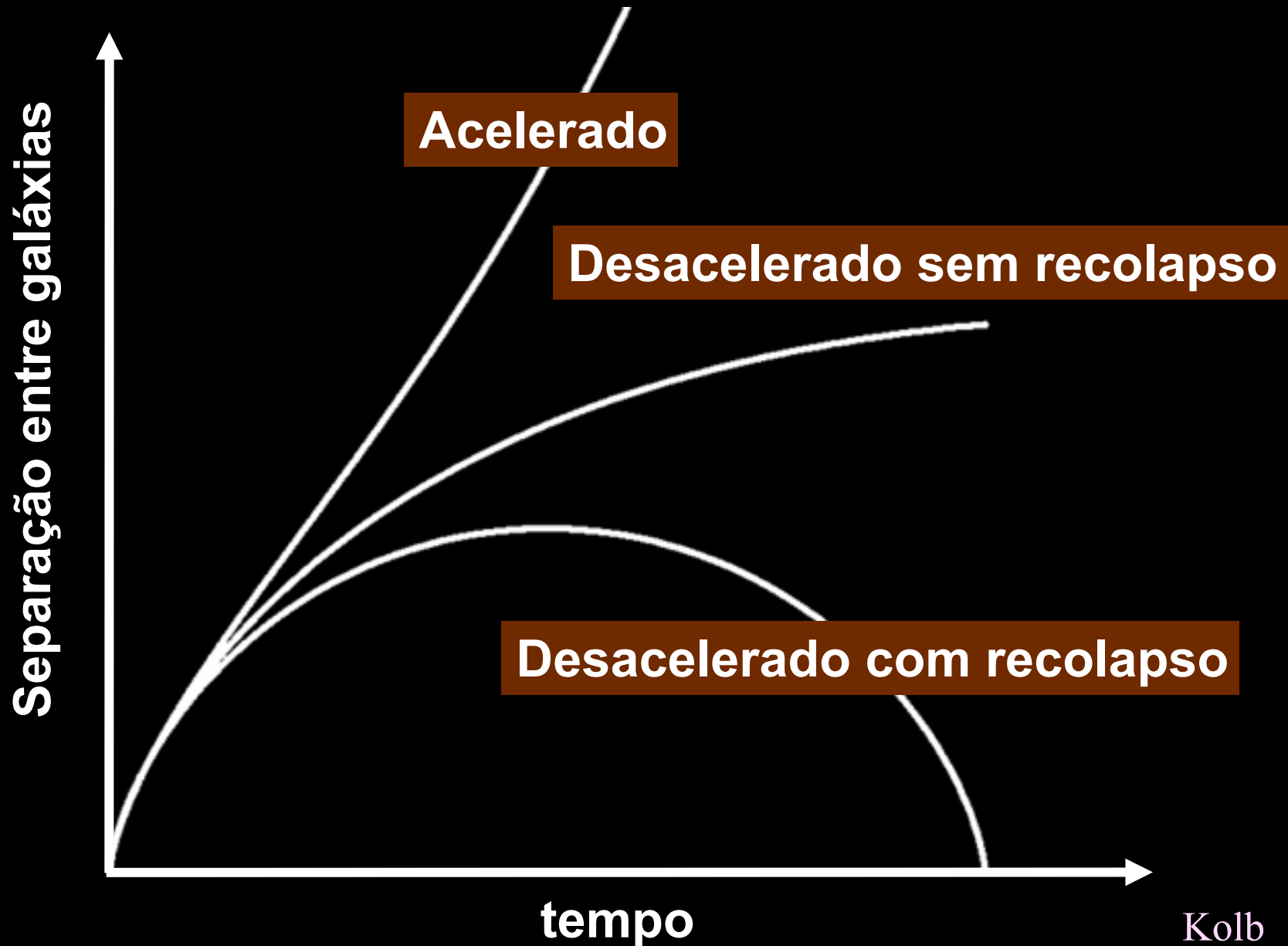


Onde está o centro do "Big-Bang"?



Não há um centro do Universo. Todos os pontos são centrais.

A expansão do Universo



Bibliografia

- **Cosmology: The Science of the Universe - *E. R. Harrison***
- **A Expansão do Universo - Revista Brasileira de Ensino de Física vol 22, p.163 (2000) - *I. Waga*.**
- **Cem Anos de Descobertas em Cosmologia e Novos Desafios para o Século XXI – Revista Brasileira de Ensino de Física –vol 27, n.1, p.157, março de 2005 – *I. Waga*.**
- **Edwin Hubble the discoverer of the Big Bang - *A. S. Sharov & I. D. Novikov***
- **Equívocos sobre o Big Bang – Scientific American Brasil – número 35, abril de 2005 , p.32, *Charles H. Lineweaver e Tamara M. Davis*.**

<http://www.if.ufrj.br/~ioav/nota.html>