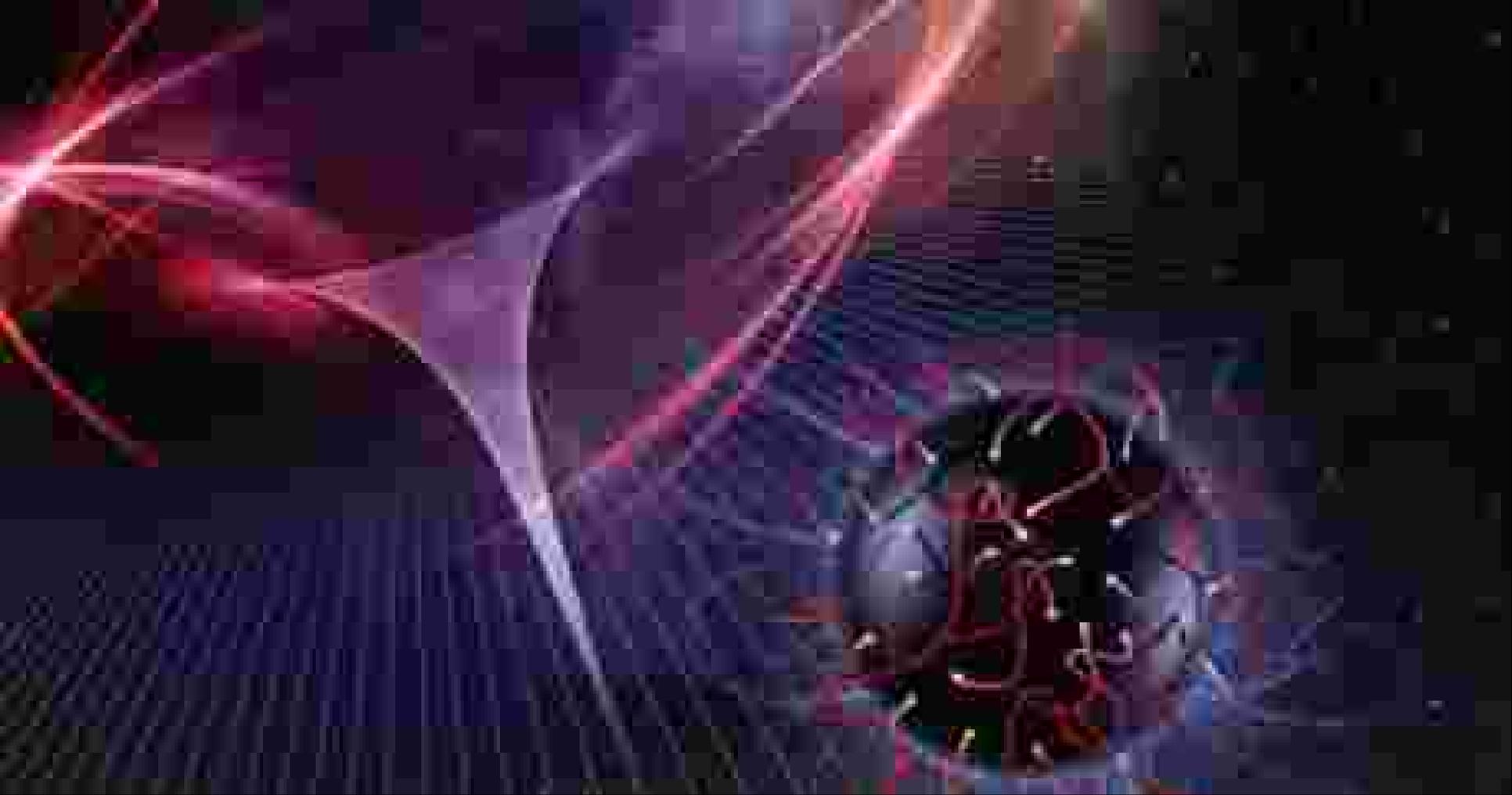


JR  
© 2017

GEORGES  
LEMAÎTRE  
HEROIC PERSISTENCE



*la naissance d'une idée, d'une théorie, d'une découverte...*

# exceptionnels

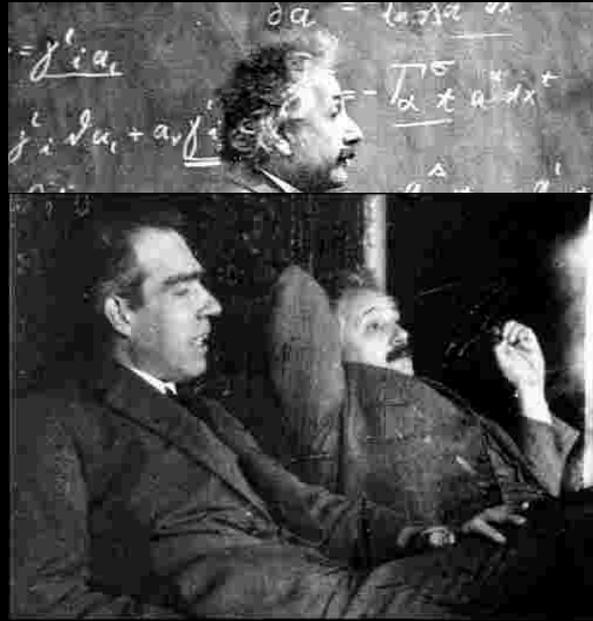


1894 1966

# exceptionnels



1864 1966

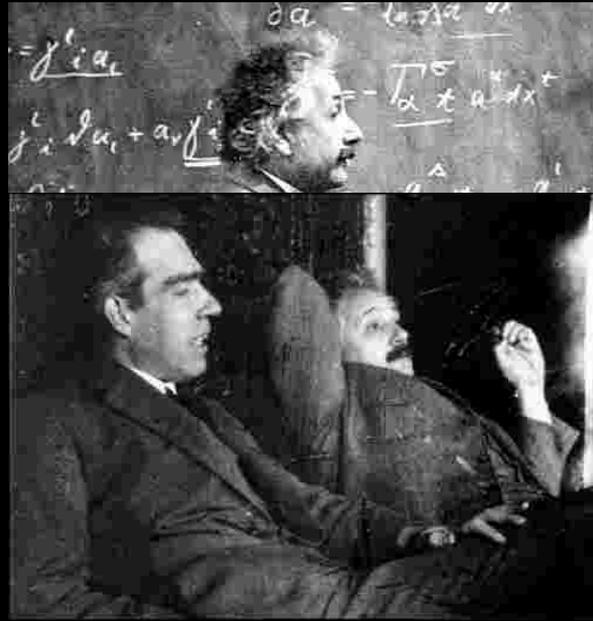


les savants d'après guerre

# exceptionnels



1864 1966



les savants d'après guerre



les découvertes

# l'astronomie devient astrophysique



dès le début du siècle des savants vont  
découvrir entre théories et observations  
l'histoire, le début et la forme de l'Univers



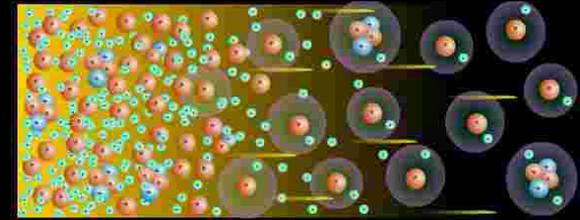
relativité générale

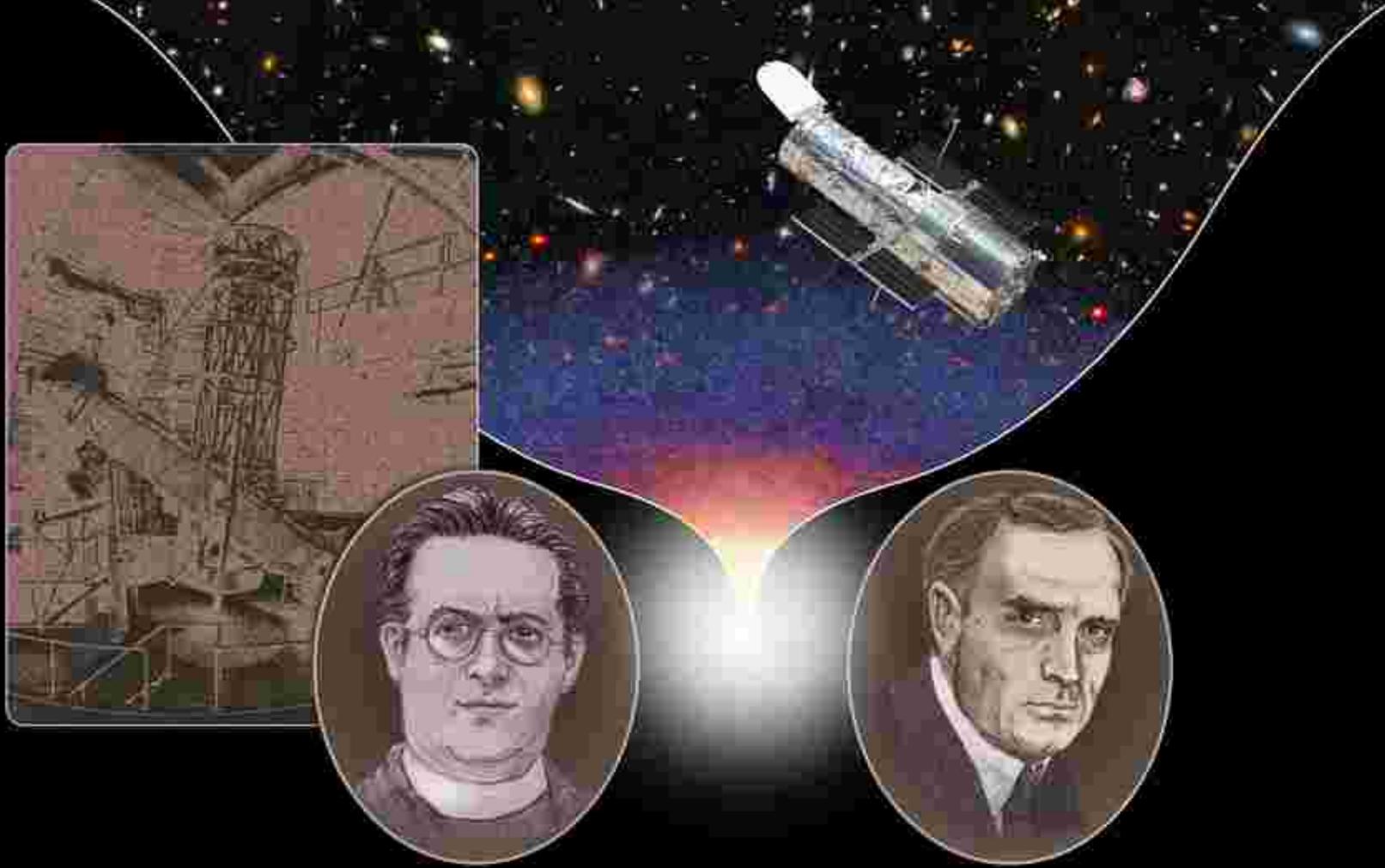
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

physique quantique



nucléosynthèse





# Georges LEMAÎTRE: l'expansion de l'Univers

Bernard LELARD

Société Astronomique de France Association d'astronomie VEGA à Plaisir

# THE BIG BANG

INFLATION

GALAXY EVOLUTION

CONTINUES...

DARK ENERGY?

FIRST STARS  
400,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

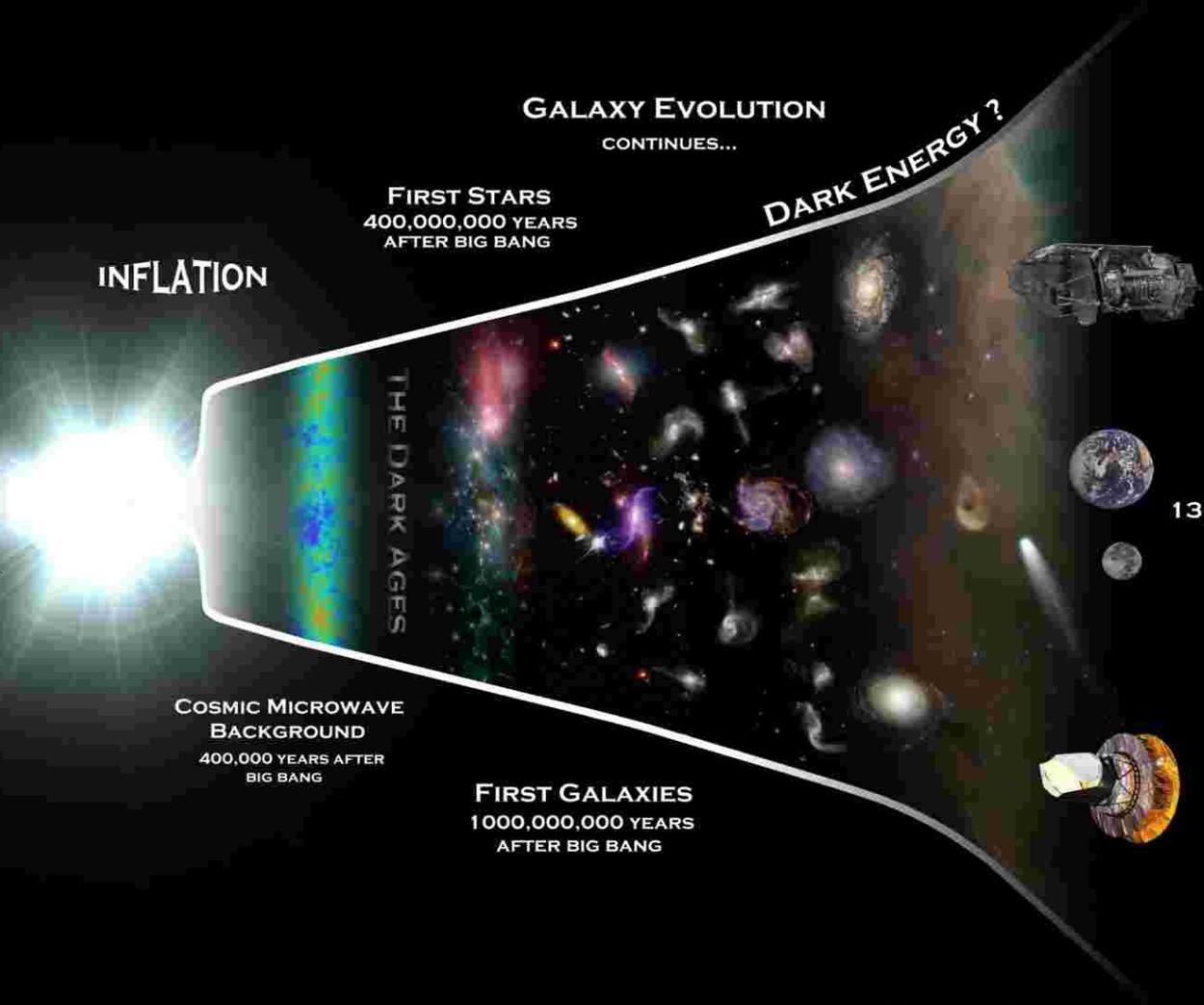
THE DARK AGES

COSMIC MICROWAVE  
BACKGROUND  
400,000 YEARS AFTER  
BIG BANG

FIRST GALAXIES  
1,000,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

FORMATION OF  
THE SOLAR SYSTEM  
8,700,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

Now  
13,700,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG



# THE BIG BANG

INFLATION

GALAXY EVOLUTION  
CONTINUES...

DARK ENERGY ?

FIRST STARS  
400,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

THE DARK AGES

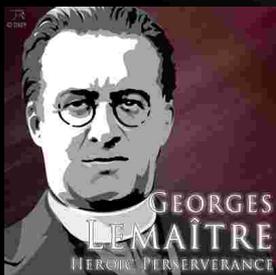
COSMIC MICROWAVE  
BACKGROUND  
400,000 YEARS AFTER  
BIG BANG

FIRST GALAXIES  
1,000,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

Now  
13,700,000,000 YEARS  
AFTER BIG BANG

## synthèse

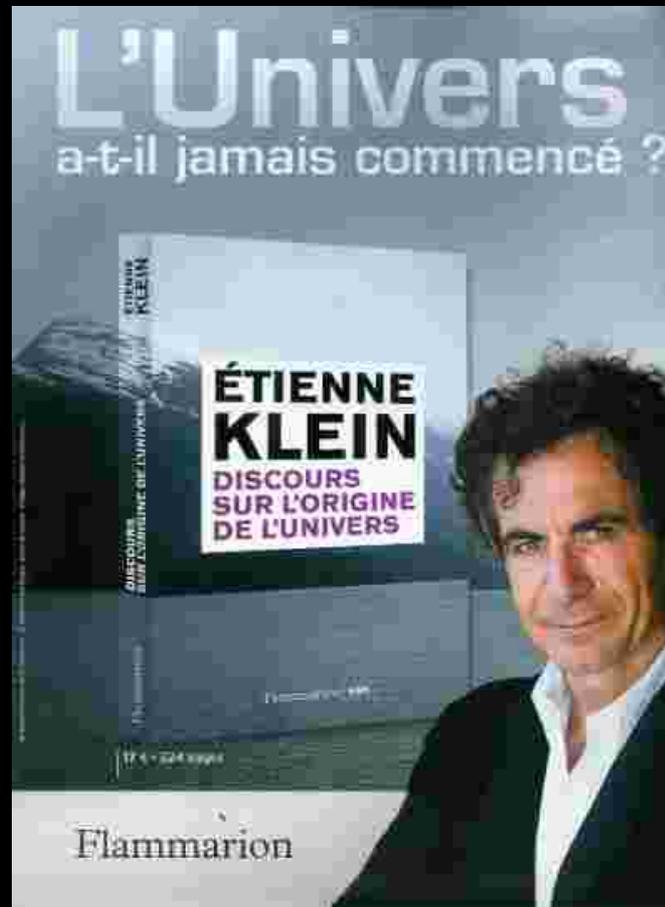
équations d'Einstein combinées  
aux observations de Hubble  
et celles de Slipher  
Lemaître découvre l'expansion de l'Unive  
imagine son début et la relation  $v = hD$



The background is a dark, abstract composition of numerous thin, glowing lines in shades of purple, blue, green, and yellow. These lines intersect and curve, creating a complex, web-like structure that resembles a neural network or a complex data visualization. The overall effect is one of dynamic energy and interconnectedness.

l'invention du temps

the Big Bang was in fact "a day without yesterday."



<<le soi-disant «Big Bang» n'est pas l'origine de l'Univers>>  
<<si tout est qu'il en ait une>>

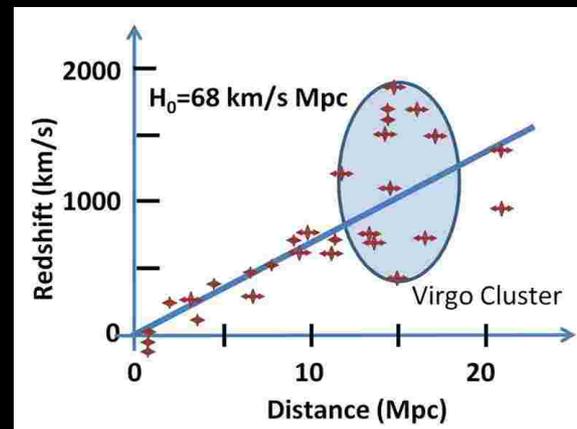
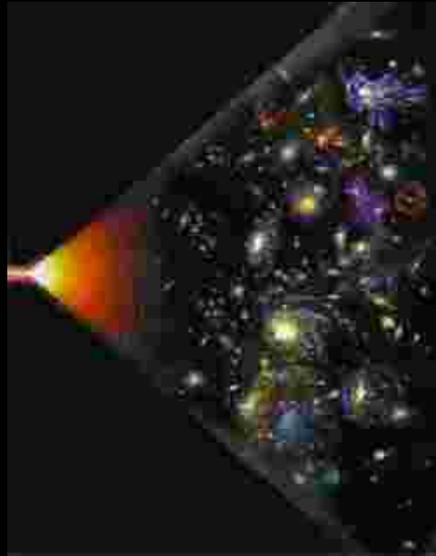
les formules simples retenues par tous

The image shows the equation  $E=MC^2$  in a white, sans-serif font. To the left of the equation is a glowing, stylized atom with a bright yellow core and blue, swirling electron orbits. The entire graphic is set against a dark blue, textured background.
$$E=MC^2$$

1515

$$V = h\nu$$

# $V = h D$ expansion de l'Univers en fonction du temps

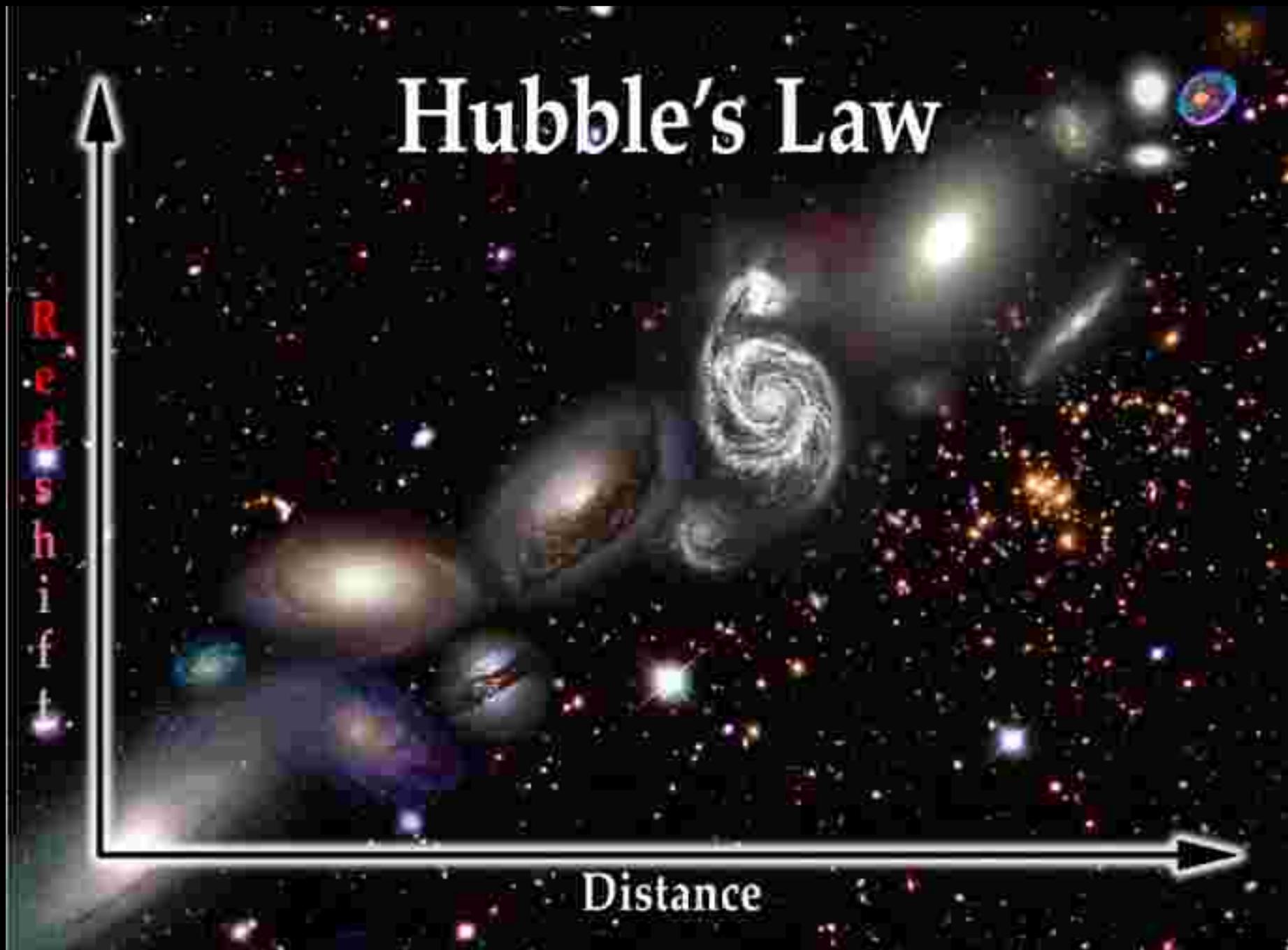


“So the translator of Lemaître’s 1927 article, whoever he (or she!) was, deliberately deleted the parts of the paper that dealt with the determination of what is presently referred to as the Hubble parameter.”

# Hubble's Law

Redshift

Distance

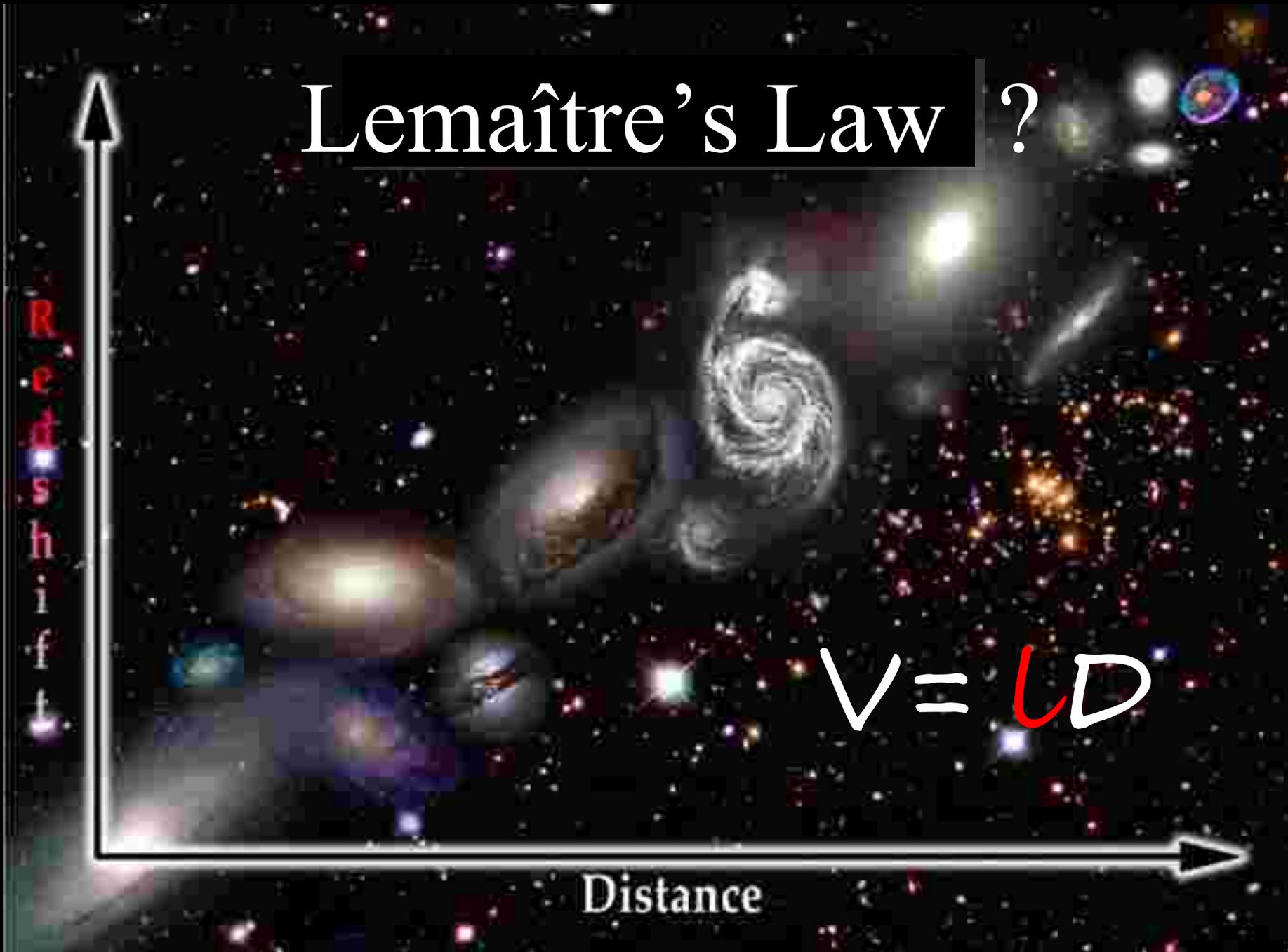


# Lemaître's Law ?

R  
e  
d  
s  
h  
i  
f  
t

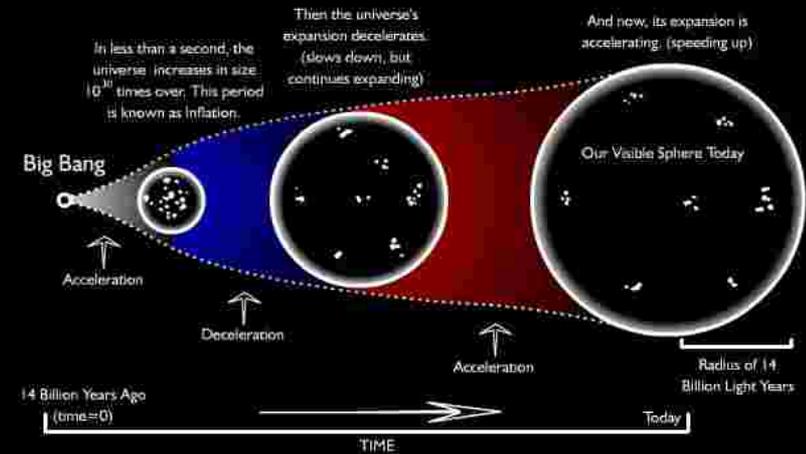
$$V = LD$$

Distance



1 1929 1931 1999 2011

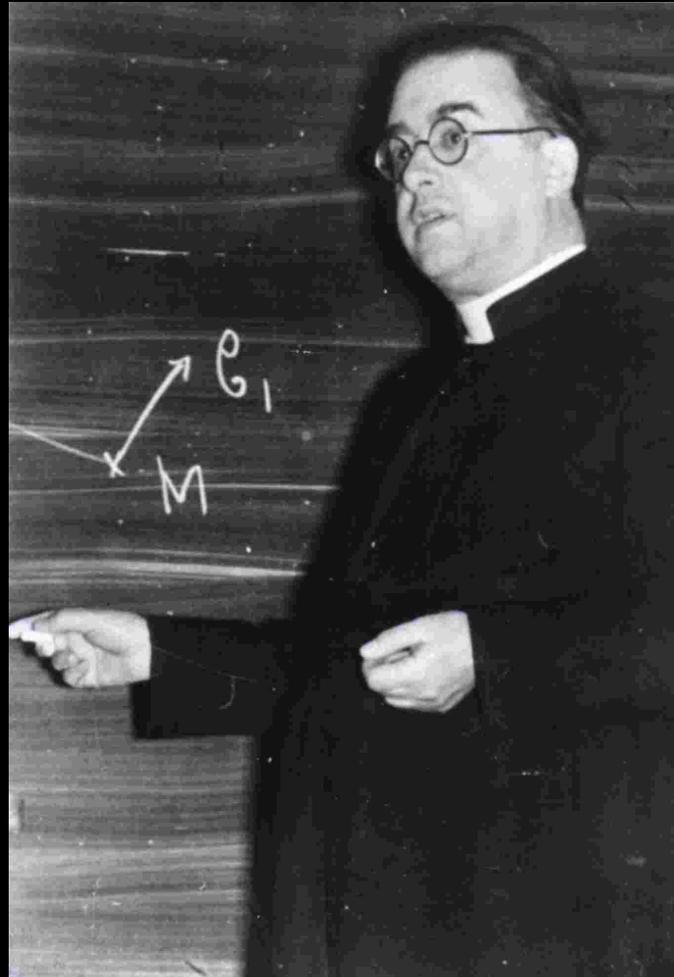
pourquoi s'y intéresser maintenant ?



Saul Perlmutter 1999 accélération de l'expansion de l'Univers  
prix Nobel 2011

1 1929 1931 1965 1999 2011

mais au tout début, puis toujours après il y a les travaux de Lemaître

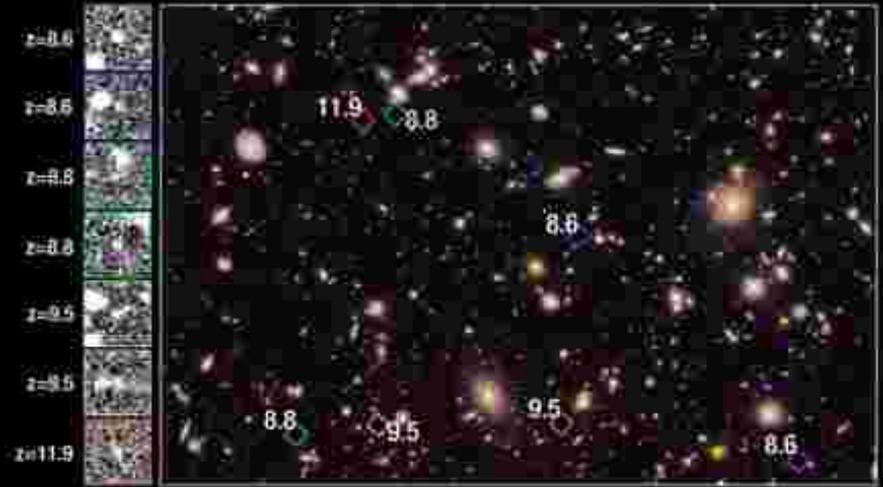




# SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE



Mario Livio



le centre de commande de Hubble à Baltimore



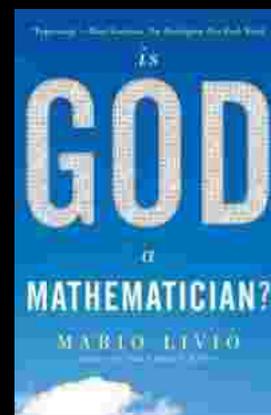
Hubble telescope



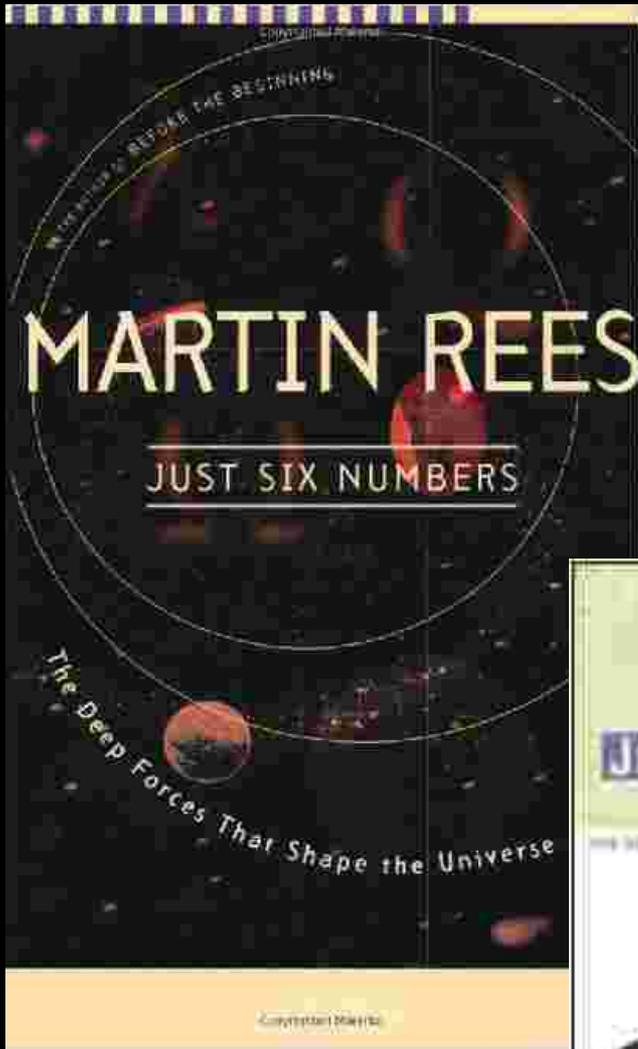
Lemaître telescope ?



pourquoi s'y intéresser ?



“The Accelerating Universe” (appeared in 2000), which discusses the ‘beauty’ of fundamental theories of the Universe, “[The Golden Ratio](#)” (appeared in 2002), which tells the story of an astonishing number, and “The Equation That Couldn’t Be Solved” (appeared in September 2005), which is the first extensive popular account of Group Theory – the language of symmetry. His new book, “[Is God A Mathematician?](#)” appeared in January 2009. The book discusses the question of why mathematics is as powerful as it is, in describing things ranging from the laws of nature to the properties of ordinary knots. Dr Livio lectures very frequently to the public. He has given more than 20 full-day seminars to the public at the Smithsonian Institution in Washington D.C, and numerous lectures at venues such as the Hayden Planetarium in New York, The Maryland Institute College of Art, The Cleveland Museum of Natural History, The Glasgow Planetarium, and many more.



Conférence

par Bernard LELARD

Président de l'association VEGA

# 7 nombres font l'Univers

Organisée par l'association d'astronomie VEGA



20h30

Entrée libre

## Samedi 17 mars

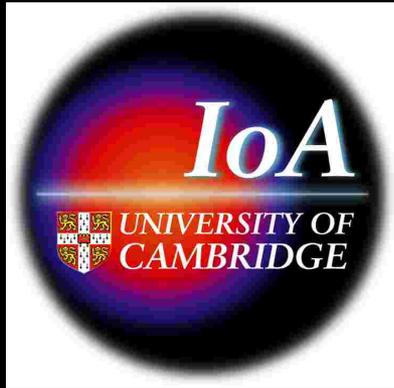
Théâtre Robert Manuel - Château de Plaisir

Renseignement : 01 34 81 15 29

ou par mail : [asso.vega@planetastronomy.com](mailto:asso.vega@planetastronomy.com)

Avec le soutien des associations Loisirs & Culture et Lecture & Dialogue

nouvel engouement pour la dualité Hubble Lemaître lancé par Mario Livio en 2012



Hubble Telescope astronomer Mario Livio reports he has gotten to the bottom of the mystery :\_

was the Belgian priest and astronomer Georges Lemaître's breakthrough paper on the expansion of the universe censored in translation?

## ARTICLE

[view full](#)

[opti](#)

NATURE | COMMENT



## Lost in translation: Mystery of the missing text solved

[Mario Livio](#)

*Nature* 479, 171–173 (10 November 2011) | doi:10.1038/479171a

Published online 09 November 2011

# Royal Academy Society



It was Einstein's own grasp of physics, however, that soon came under fire. In 1929 Edwin Hubble's systematic observations of other galaxies confirmed the red shift. In England the Royal Astronomical Society gathered to consider this seeming contradiction between visual observation and the theory of relativity. Sir Arthur Eddington volunteered to work out a solution. When Lemaître read of these proceedings, he sent Eddington a copy of his 1927 paper. The British astronomer realized that Lemaître had bridged the gap between observation and theory. At Eddington's suggestion, the Royal Astronomical Society published an English translation of Lemaître's paper in its *Monthly Notices* of March 1931.

Most scientists who read Lemaître's paper accepted that the universe was expanding, at least in the present era, but they resisted the implication that the universe had a beginning. They were used to the idea that time had gone on forever. It seemed illogical that infinite millions of years had passed before the universe came into existence. Eddington himself wrote in the English journal *Nature* that the notion of a beginning of the world was "repugnant."

The Belgian priest responded to Eddington with a letter published in *Nature* on May 9, 1931. Lemaître suggested that the world had a definite beginning in which all its matter and energy were concentrated at one point:

If the world has begun with a single quantum, the notions of space and time would altogether fall to have any meaning at the beginning; they would only begin to have a sensible meaning when the original quantum had been divided into a sufficient number of quanta. If this suggestion is correct, the beginning of the world happened a little before the beginning of space and time.

In January 1933, both Lemaître and Einstein traveled to California for a series of seminars. After the Belgian detailed his theory, Einstein stood up, applauded, and said, "This is the most beautiful and satisfactory explanation of creation to which I have ever listened." Duncan Aikman covered these seminars for the *New York Times Magazine*. An article about Lemaître appeared on February 19, 1933, and featured a large photo of Einstein and Lemaître standing side by side. The caption read, "They have a profound respect and admiration for each other."



autre version ...

« l'oubli »

## Lemaître (1927 vs.1931)

Therefore

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

is the apparent Doppler effect due to the variation of the radius of the universe. It equals the ratio of the radii of the universe at the instants of observation and emission, diminished by unity.

$v$  is that velocity of the observer which would produce the same effect. When the light source is near enough, we have the approximate formulae:

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

where  $r$  is the distance of the source. We have therefore

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr} \quad (23)$$

From a discussion of available data, we adopt

$$\frac{R'}{R} = 0.68 \times 10^{-27} \text{ cm.}^{-1} \quad (24)$$


---

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg (\*), 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 (\*).

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^6}{10^6 \times 3,08 \times 10^{13} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm.}^{-1} \quad (24)$$

Text translated by Eddington

original ...

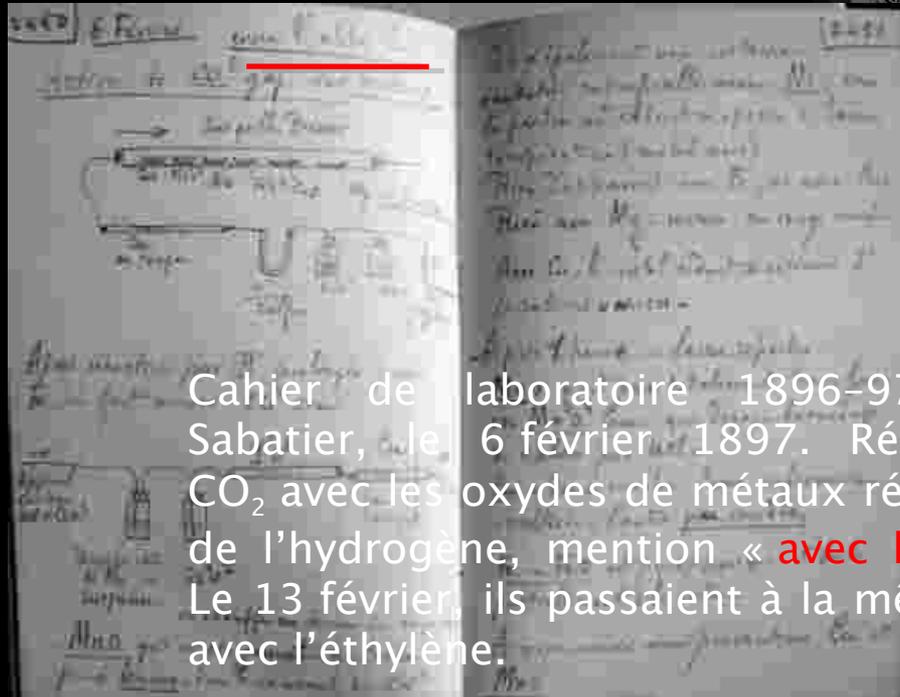
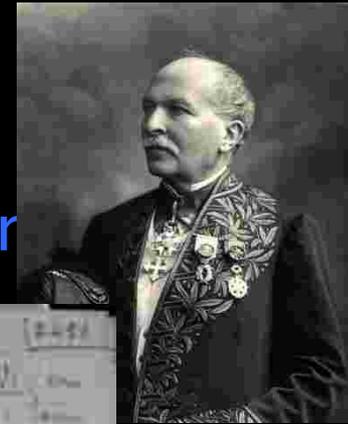


abbé Jean Baptiste Sendérens  
(1856 1937)

découvreur des procédés de catalyse dans les métaux

n'a pas eu le prix Nobel 1912  
séparation de l'Eglise et de l'Etat  
co directeur de Poulenc

## une histoire dans l'histoire



Cahier de laboratoire 1896-97 de Paul Sabatier, le 6 février 1897. Réaction de  $\text{CO}_2$  avec les oxydes de métaux réduits avec de l'hydrogène, mention « avec l'abbé S ». Le 13 février, ils passaient à la même étude avec l'éthylène.

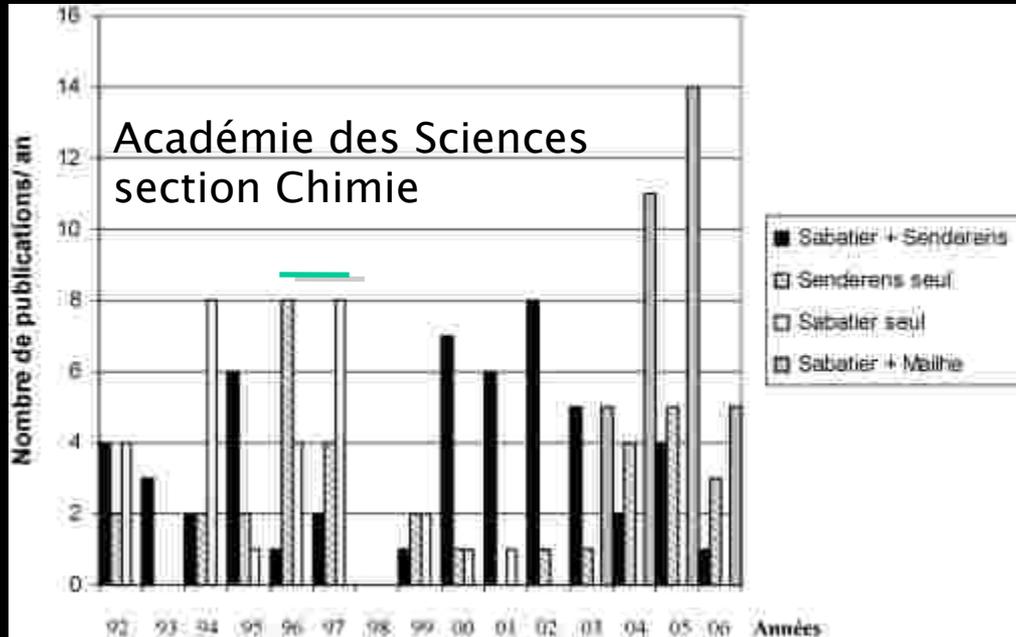


2004

# catalyse Sabatier Senderens



l'Ecole de Chimie de Toulouse



# L'INVENTION DU BIG BANG



A. Friedmann  
(1888-1925)



G. Lemaître  
(1894-1966)



G. Gamow  
(1904-1968)

JEAN-PIERRE LUMINET  
L'invention  
du Big Bang

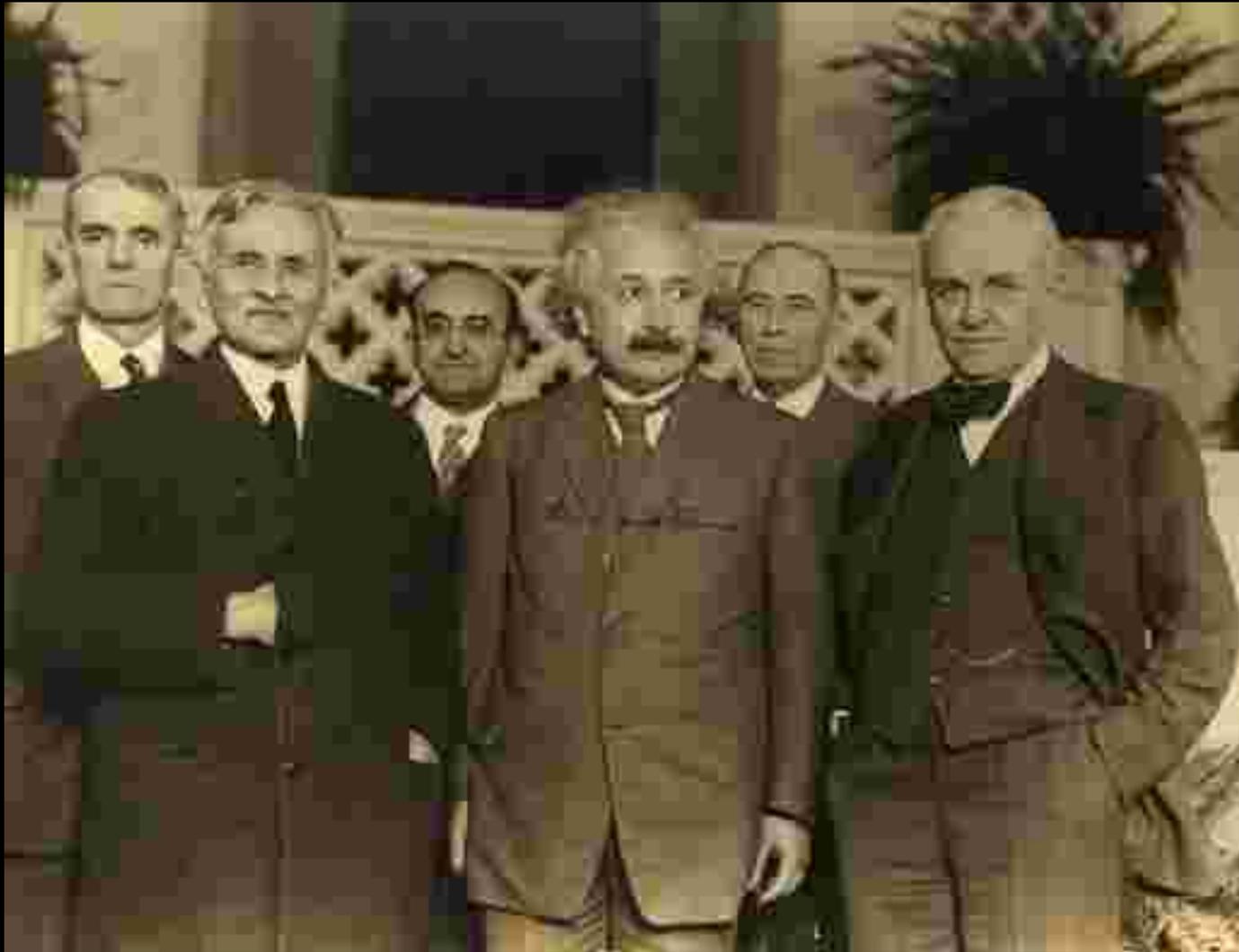


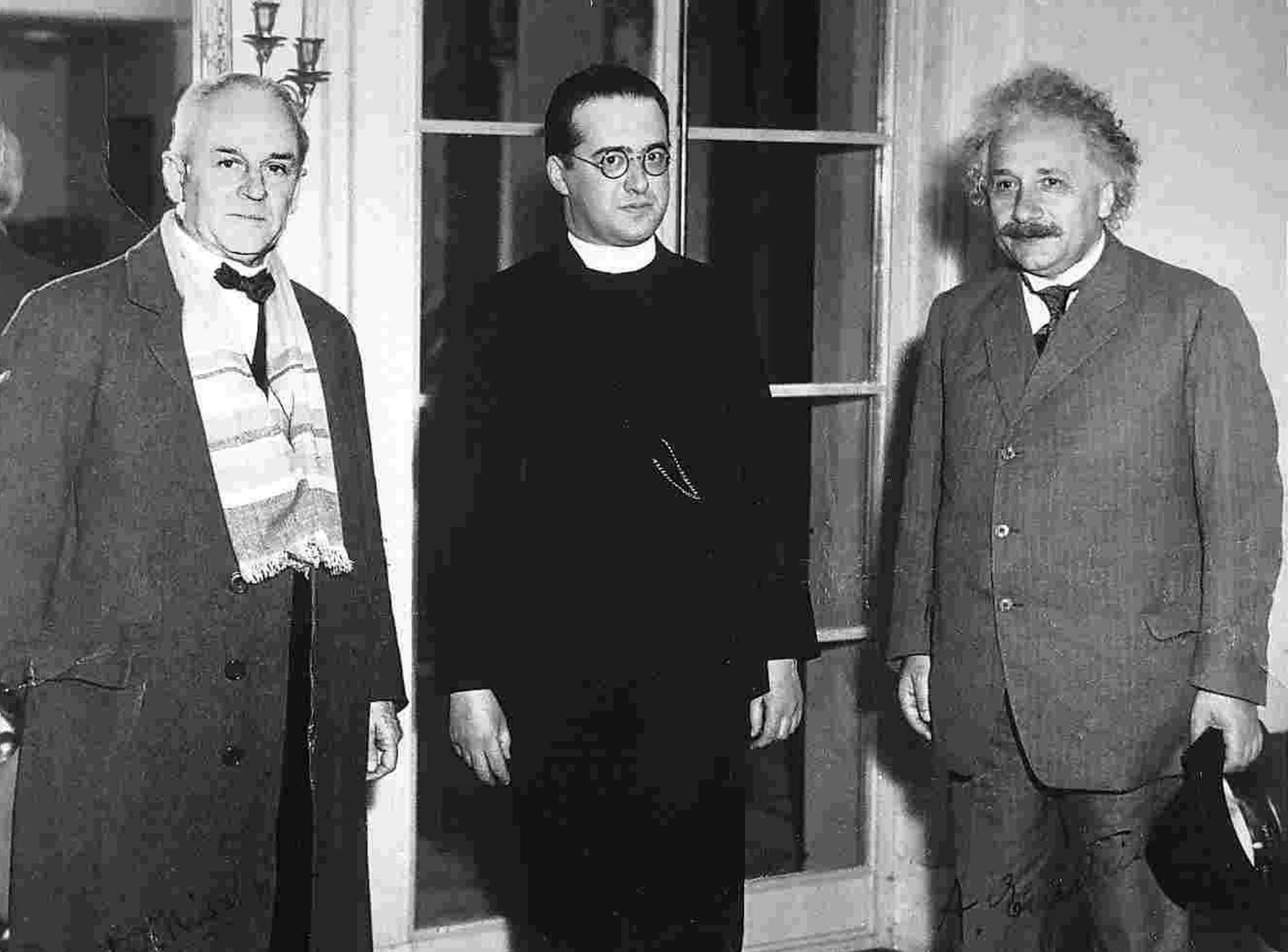
SCIENCE

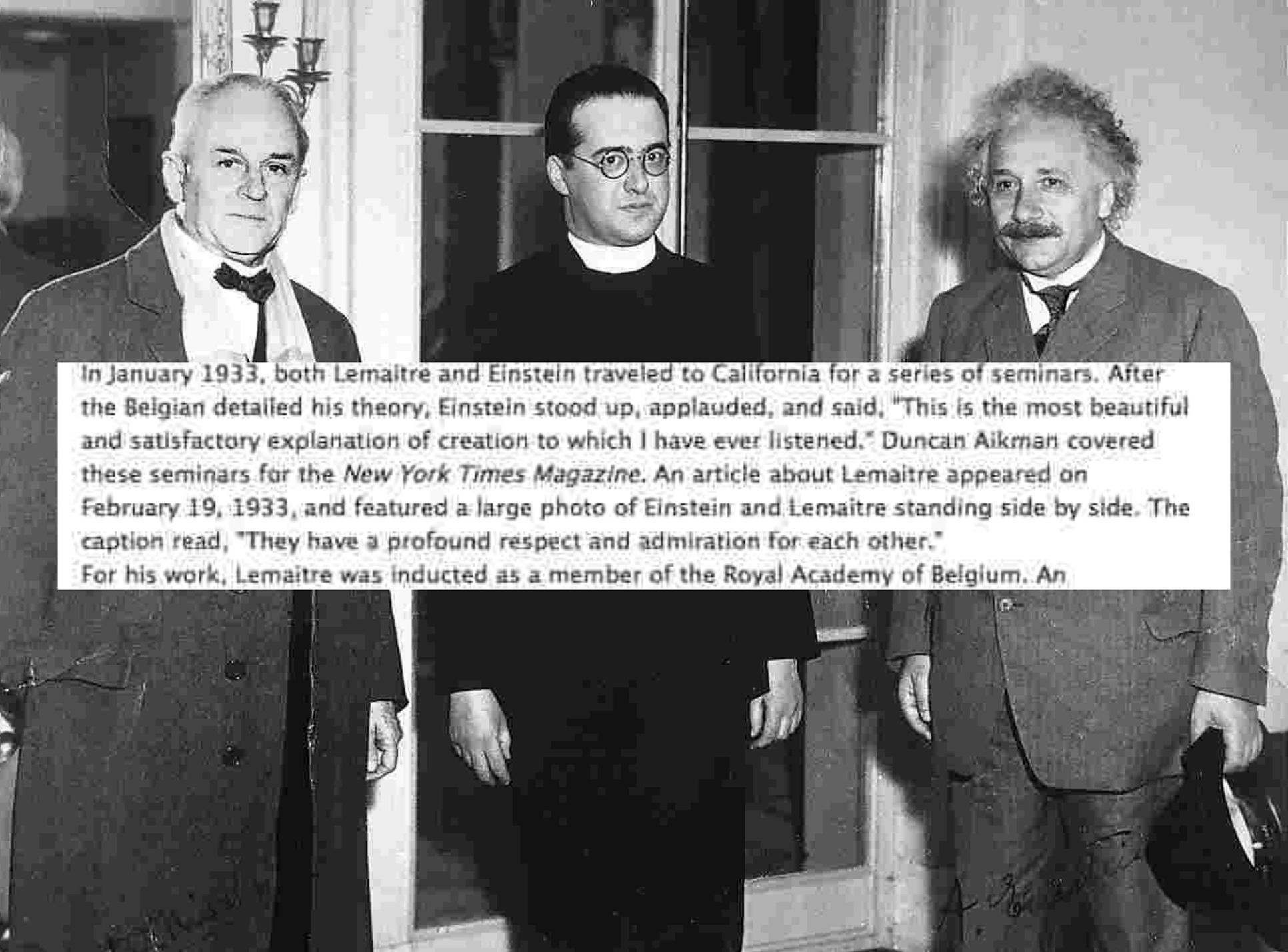


**THE BIG BANG GANG**

janvier 1933 à Pasadena







In January 1933, both Lemaître and Einstein traveled to California for a series of seminars. After the Belgian detailed his theory, Einstein stood up, applauded, and said, "This is the most beautiful and satisfactory explanation of creation to which I have ever listened." Duncan Aikman covered these seminars for the *New York Times Magazine*. An article about Lemaître appeared on February 19, 1933, and featured a large photo of Einstein and Lemaître standing side by side. The caption read, "They have a profound respect and admiration for each other."

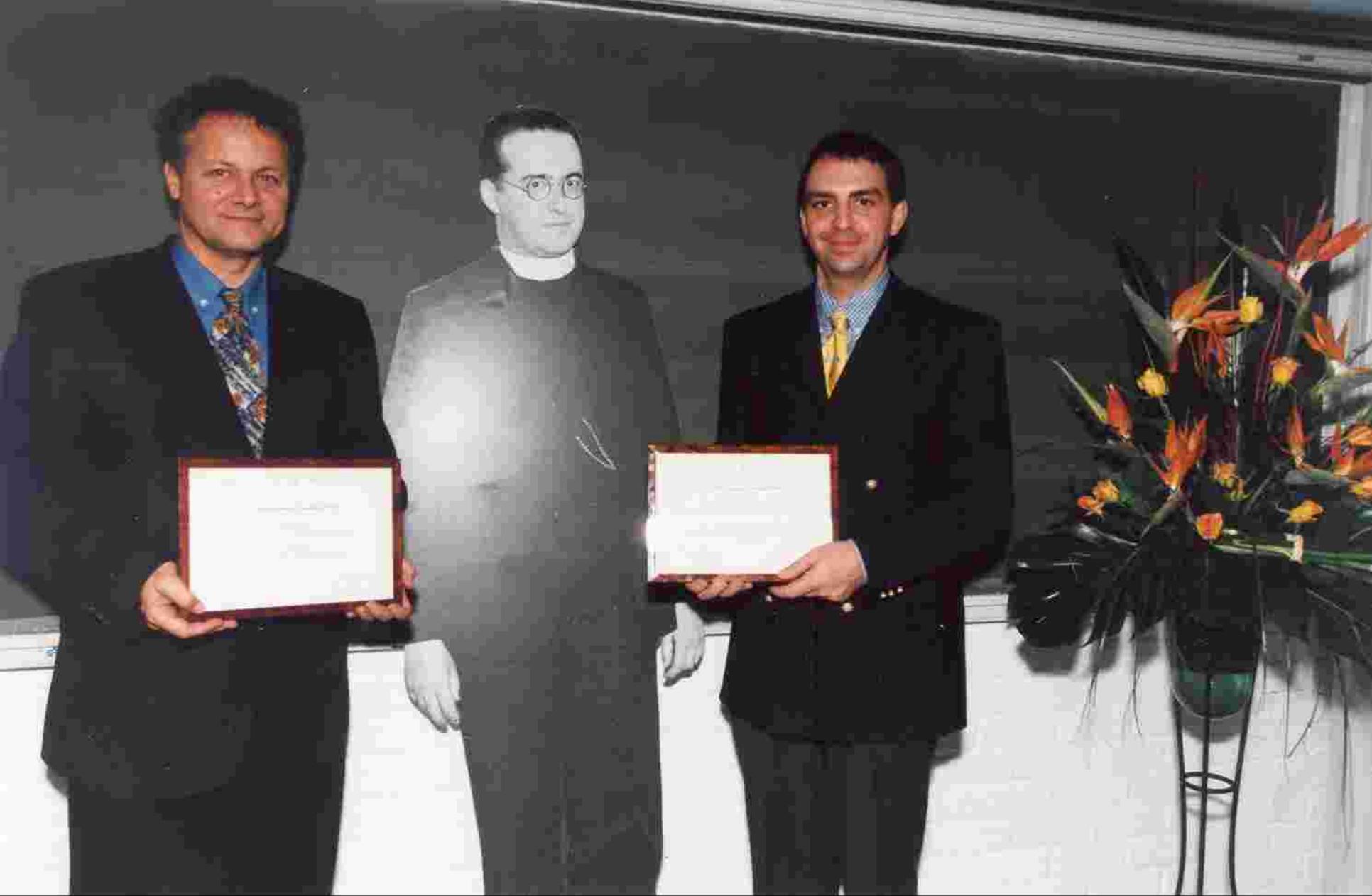
For his work, Lemaître was inducted as a member of the Royal Academy of Belgium. An

bien qu'entouré de 2 prix Nobel, LEMAÎTRE  
est dans l'anonymat le plus complet auprès du Public,  
et sous estimé dans la communauté des  
physiciens, astrophysiciens, cosmologistes



« les notoriétés respectives de  
Friedmann, Lemaître et Gamov  
sont inversement proportionnelles  
à l'importance de leur œuvre cosmologique !  
Lemaître étant le plus mal loti des trois »

Jean-Pierre LUMINET  
prix international de cosmologie Georges LEMAÎTRE  
après P.J.E. PEEBLES en 1997



2 décembre 1997 prix LEMAÎTRE attribué à Jean Pierre LUMINET et Dominique LAMBERT

premier lauréat du prix  
LEMAÎTRE en 1995

James PEEBLES  
qui admirait

son œuvre cosmologique  
est titulaire de la chaire  
Albert Einstein à Princeton



James Peebles, astronome né en 1935.

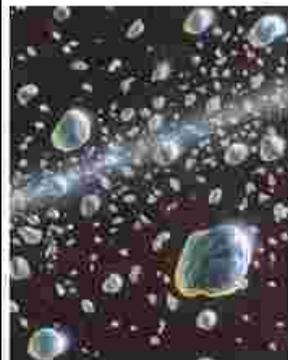
**Robert DICK ( celui de la théorie Brans Dick sur la  
RG ) a donné l'interprétation cosmologique du  
rayonnement**

déteçté accidentellement en 1964 par Wilson et  
Penzias. ses travaux portent sur la formation des  
grandes structures et sur la nucléosynthèse  
primordiale et l'abondance des éléments.

Il introduit en 1982 le modèle de  
la matière sombre et froide

> Archives actualités > Jean Kovalevsky et André Berger reçoivent le Prix Lemaître

### Jean Kovalevsky et André Berger reçoivent le Prix Lemaître



L'UCL a remis, ce 24 mars 2010, les Prix Georges Lemaître 2009 et 2010. A l'honneur, Jean Kovalevsky, astronome français et André Berger, astronome et professeur UCL.

Jean Kovalevsky, astronome émérite de l'Observatoire de la Côte d'Azur, a reçu le Prix Georges Lemaître. Il est récompensé pour ses contributions en astronomie fondamentale ainsi que pour son soutien et sa collaboration avec les chercheurs belges. Il est notamment l'auteur de nouvelles méthodes de construction du mouvement des corps célestes et de leur application au mouvement de notre satellite. Avec l'instrument de télémétrie laser-Lune, il a effectué des mesures de la distance de notre satellite.

Autre prix, celui décerné par les AUL (associations des anciens et amies) fondatrices du Prix Georges Lemaître, à titre exceptionnel, à André Berger pour ses contributions majeures à la théorie astronomique des paléoclimats. Cette récompense également une brillante carrière académique au sein de l'UCL, notamment mise toutes ses compétences au service du développement international, depuis plusieurs dizaines d'années.

André Berger recevra, par ailleurs, les insignes de la Légion d'honneur, décoration honorifique française, récompensant le 25/03/2010



### LE PRIX GEORGES LEMAÎTRE

C'est en 1995 que les AUL, Association des Anciens et Amis de Louvain, créèrent le Prix Georges Lemaître destiné à récompenser un scientifique ayant contribué de façon remarquable au développement et à la diffusion des connaissances dans les domaines de la cosmologie, de l'astronomie, de l'astro-physique, de la géophysique ou de la recherche spatiale. D'une valeur de 25 000 euros, il est attribué tous les deux ans. Le but poursuivi par les initiateurs du prix est de rappeler en Belgique et à l'étranger les mérites scientifiques du professeur Georges Lemaître de l'Université catholique de Louvain, inventeur de la théorie de l'atome primitif, contribution capitale au développement de la connaissance de l'Univers.

Le lauréat est choisi par un comité de sélection international présidé par le Recteur de l'Université catholique de Louvain.

> Archives actualités > Prix Georges Lemaître 2012

### Prix Georges Lemaître 2012



Ce 23 novembre, le Professeur Michael Heller, du Vatican Observatory Pontifical Academy of Sciences, Copernicus Center for Interdisciplinary Studies (Cracovie) s'est vu décerner le Prix Georges Lemaître 2012.

C'est un comité international présidé par Bruno Delvaux, recteur de l'UCL qui a décerné le Prix Georges Lemaître 2012 à Michael Heller.

Ce vendredi, le recteur étant toujours en mission en Australie, c'est Vincent Yzerbyt, le directeur de la recherche, qui a remis le Prix au Professeur Michael Heller. La cérémonie s'est déroulée au sénat académique dans les Hautes Universitaires.

Le Professeur Michael Heller a été sélectionné sur base de ses contributions majeures en cosmologie physique. Il a renouvelé en profondeur l'étude des rapports entre sciences et théologie. Ce fut l'un des tout premiers à avoir découvert, classé, étudié et

publié des manuscrits importants et inédits de Georges Lemaître contribuant ainsi, dans le cadre d'une collaboration active avec l'UCL, à faire connaître la personne et l'œuvre scientifique du cosmologiste louvaniste en Europe et dans le monde anglo-saxon.

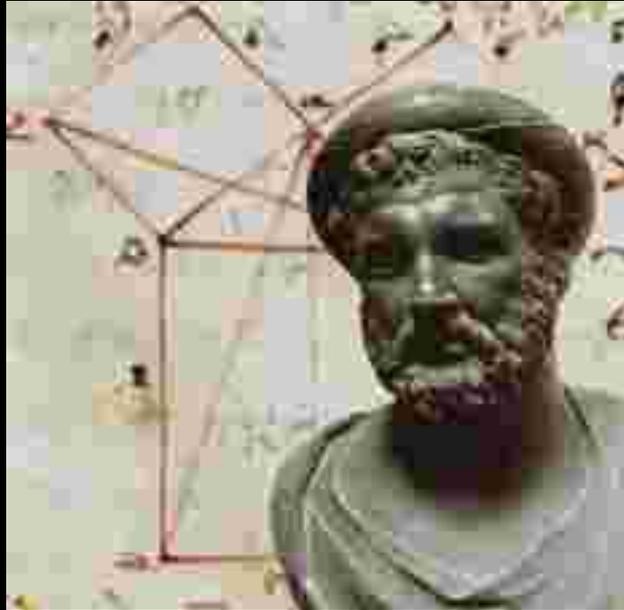
Créé en 1995 par l'Association des Anciens et Amis de Louvain, le Prix Georges Lemaître est destiné à récompenser un scientifique ayant contribué de façon remarquable au développement et à la diffusion des connaissances dans les domaines de la cosmologie, de l'astronomie, de l'astro-physique, de la géophysique ou de la recherche spatiale. D'une valeur de 25.000 euros, il est attribué tous les deux ans.

« la cosmologie est aujourd'hui la science la plus passionnante  
et pour cela la plus étudiée aujourd'hui »

Gilles Cohen-Tanoudji, SAF 5 mai 2012



# cosmos



κόσμος, *kósmos* (« *ordre, bon ordre, parure* »)

*pour les pythagoriciens* : « *harmonie*, ordre de l'univers »  
d'ou « *univers* »

EINSTEIN aussi :

« je doute que quiconque d'autre que vous ait étudié avec autant de soins les implications cosmologiques de la théorie de la relativité »

( lettre d'Einstein à Lemaître du 26 septembre 1947  
traduction Luminet )





Einstein américain 1940  
demande naturalisation: 1933

TRIPPLICATE  
(To be given to  
applicant)

No. 3442

# UNITED STATES OF AMERICA

## DECLARATION OF INTENTION

(Valid for all purposes seven years after the date hereof)

United States of America In the District of \_\_\_\_\_  
at \_\_\_\_\_  
District of New Jersey at The United States of Trenton, N. J.

I, Dr. Albert Einstein  
now residing at 112 Mercer St., Princeton, N.J.  
occupation Professor age 55 years, do declare to all that my permanent abode is in  
the Male sex, White color, Fair complexion, Brown color of eyes, Brown  
color of hair, Grey hair, 5 feet 7 inches high, weight 175 pounds, marital condition single  
I was born at Ulma, Germany, on March 14, 1879  
I was educated at Ulma, Germany, March 14, 1879  
I was married to Maria, Germany, on April 8th, 1917, at Berlin, Germany. I also had to  
live at Munich, Germany, on January 18, 1897. I am the naturalized citizen of the United States  
at New York, NY, on June 5, 1905. I am a permanent resident thereof, and am  
married to with me children, and the name, date and place of birth,  
and place of residence of each of said children are as follows: Albert born 5-14-1908 and  
Edward born 8-08-1910 both born and reside in Switzerland

I have not been convicted of any crime involving moral turpitude, nor  
my last foreign residence was Berlin, Germany, Great Britain  
I emigrated to the United States of America from Berlin, Germany, Great Britain  
my lawful entry for permanent residence in the United States was at  
made the case of Albert Einstein, New York, NY, June 5, 1905  
on the case of Ed. Queen of Bermuda

I will before being admitted to citizenship, renounce forever all allegiance and fidelity to any foreign prince, potentate,  
state, or sovereignty, and, particularly, by name, to the prince, potentate, state, or sovereignty of which I was in all the time  
of admission a citizen or subject; I am not an anarchist; I am not a polygamist nor a believer in the practice of polygamy; and  
it is my intention to good faith to become a citizen of the United States of America and to reside permanently therein; and I  
swear that the photographs affixed to this declaration and triplicate hereof is a likeness of me at the time of this  
declaration.

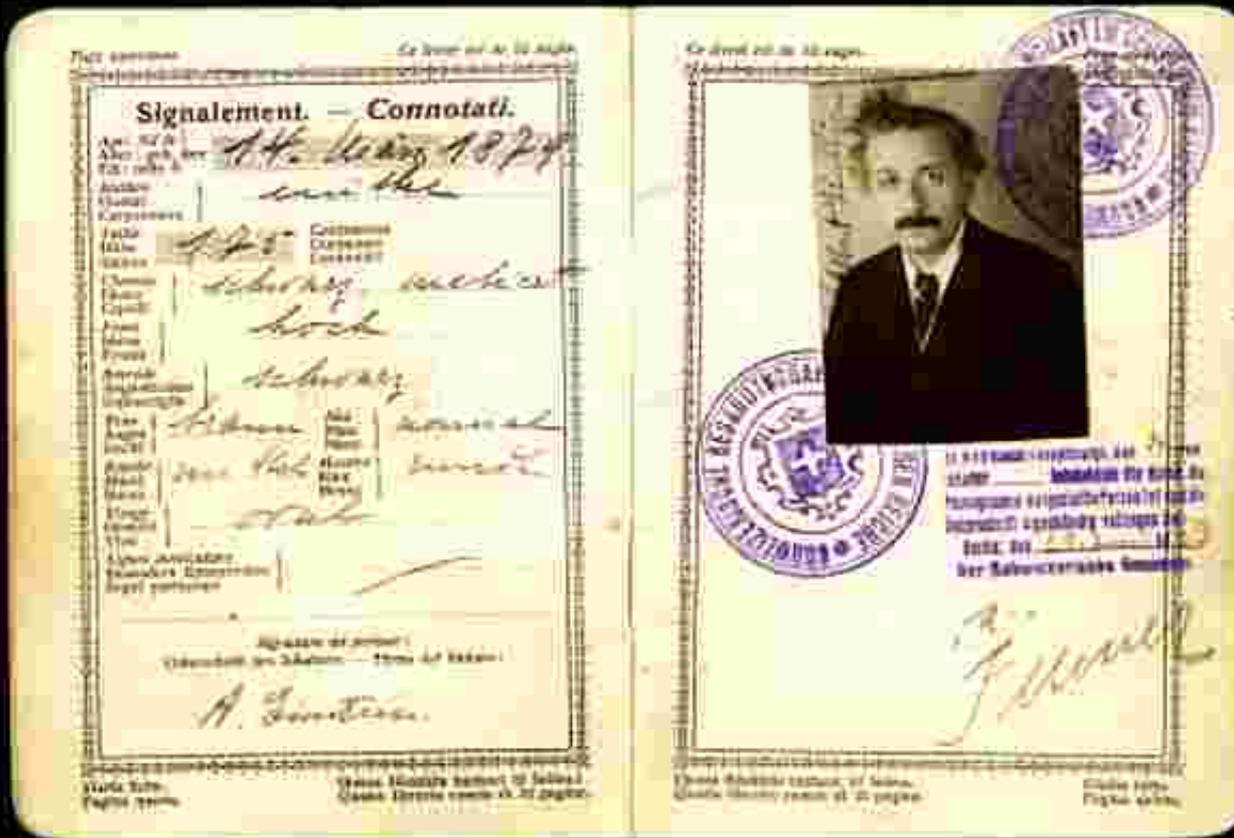


Albert Einstein  
Subscribed and sworn to before me in the office of the Clerk of said Court,  
at Trenton, N. J., on 18th day of January  
1925. Certificate No. 3-130742.  
I, George W. Spenser, Clerk of said Court, do hereby certify that the  
contents of this declaration and triplicate hereof, showing the lawful entry of the  
applicant for permanent residence on the date stated above, has been examined  
by me. The photograph affixed to this declaration and triplicate hereof is a like-  
ness of the applicant.



Einstein et Marie Curie

No. 5773



Einstein est Suisse depuis 1901, sera Américain et Suisse en 1940  
 adjudant Lemaître 3ième division d'infanterie bataille de l'Yser 4 année 1914-1919  
 au front lit dans les tranchées le cours d' »Electricité et Optique « de Poincaré  
 captain Hubble in the 343 rd Infantry, 86th Division Flandres et occupation Allemagne  
 1917 télégraphe à Hale « regret cannot accept your invitation. Am off to the war »  
 lieutenant aviateur Friedmann front russe 1914-1916  
 Einstein professeur à Berlin en 1914 Schwartzchild meurt en 1916 au front russe  
 Eddington objecteur de conscience à Londres doit partir, retenu par Dyson

# les grandes découvertes du XX ième siècle au début du siècle

*progrès en cosmologie*

*contributions LEMAÎTRE*

Einstein Hilbert équations relativité générale	1915
Schwarzschild métrique champ statique masse sphérique dans le vide	1916
Einstein premier article de cosmologie	1917
De Sitter espace statique et vide de matière	1917
Weyl unification envisagée gravitation électromagnétisme	1918
Shapley Curtis grand débat nature nébuleuses	1920



Friedmann premier modèle Univers <u>dynamique</u>	1922	« la Physique d'Einstein »
	1924	<b>solutions dynamique</b> cas Univers homogène isotrope
Eddington 36 redshifts sur 41	1924	seconde métrique De Sitter
Hubble trouve M31 hors notre Galaxie fin du grand débat	1925	<b>relation linéaire entre distance et redshift</b>
	1927	<b>modèle <u>Univers expansion</u></b> courbure et positives interprétation du redshift lié à l'expansion
Robertson métrique générale de tout type d'Univers homogène	1929	

# les fondations de la cosmologie (1915–2003)

## *progrès en cosmologie*

Hubble établit expérimentalement  
relation–distance redshift  
mais ignore expansion

Gamov **nucléosynthèse cosmologique**  
Alpher Bethe G **abondance** éléments  
Alpher Herman prédiction **CMB** 5K°  
1951 modèle mécanique amas galaxies  
Baade échelle distances extragalac.  
Penzias Wilson Peebles **découverte CMB**  
Guth Englert modèle **inflation**  
Satellite **COBE**  
**Accélération expansion observée**  
Satellite **WMAP** âge U 13.7milliards a

## *contributions LEMAÎTRE*

1929  
1930 le modèle Lemaître adopté par Eddington  
1931 modèle d'Univers initialement singulier  
**hypothèse du quantum primitif**  
stagnation création galaxies  
**prédiction rayonnement fossile**  
proposition origine quantique de l'Univers  
1932 interprétation de l'équation de Dirac  
relation densité–taux expansion  
1933 occurrences singularités  
1934 **lien – énergie du vide**  
1945 publication « l'atome primitif »  
1946  
1948 résolution problème de Störmer  
transformée de Fourier rapide  
1952 problème des 3 corps

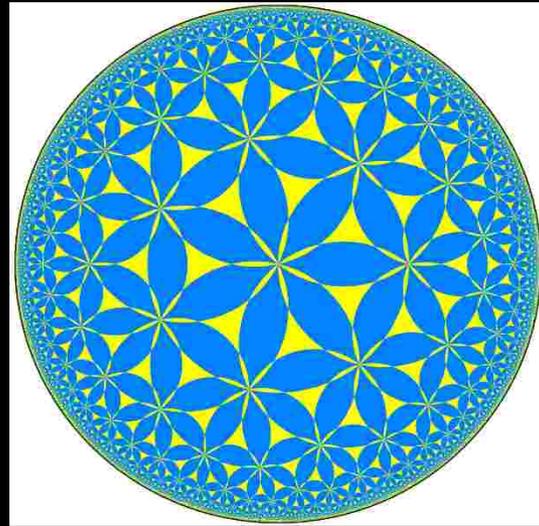
1980

1992

1998

2003

# LEMAÎTRE est à l'origine des fondements de la cosmologie relativiste



l'expansion de l'Univers  
son origine singulière  
l'existence d'un rayonnement fossile

# LEMAÎTRE parle au monde scientifique des années trente



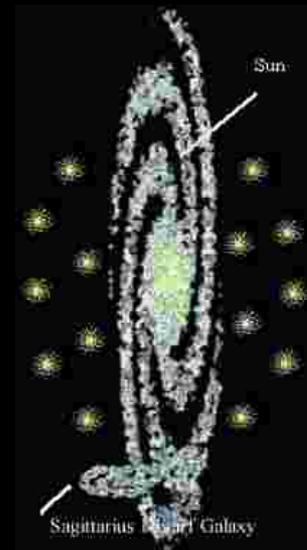
# le profil idéal : double compétence

mathématicien

$$\frac{1}{A} \int \frac{1}{U^2} dx = \frac{4A^2}{A} \int \frac{1}{(x^2 + k)^2} dx = \frac{4A}{k^2} \int \frac{1}{\left(\left(\frac{x}{\sqrt{k}}\right)^2 + 1\right)^2} dx$$

Friedmann  
Penrose

astronome



Hubble  
Shapley  
Slipher  
Curtis  
Eddington

De Sitter

=  
cosmologiste

Lemaître  
Silberstein  
Peebles  
Gamov  
Hoyle  
Hawking



# LEMAÎTRE et la SAF

5 décembre 1934 sous l'égide de la SAF  
conférence à la Sorbonne sur  
« l'expansion de l'Univers »  
article dans « l'Astronomie » de janvier  
1935

10 juin 1936 obtient de la SAF  
la médaille JANSSEN

6 novembre 1949 sous l'égide de la SAF  
commémoration du 2<sup>ième</sup> centenaire  
de la naissance de LAPLACE  
conférence « LAPLACE et la mécanique céleste »

certaines photos et documents ci-après proviennent du  
**fond d'archives LEMAÎTRE**  
et sont protégés par des droits d'auteurs

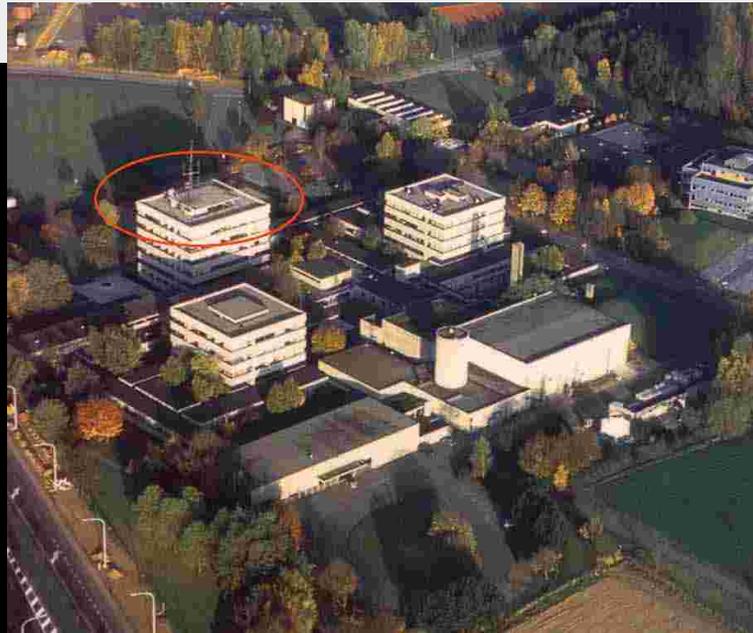
**UCL**  
**Université catholique de Louvain**



**Institut d'Astronomie et de  
Géophysique G. Lemaître**

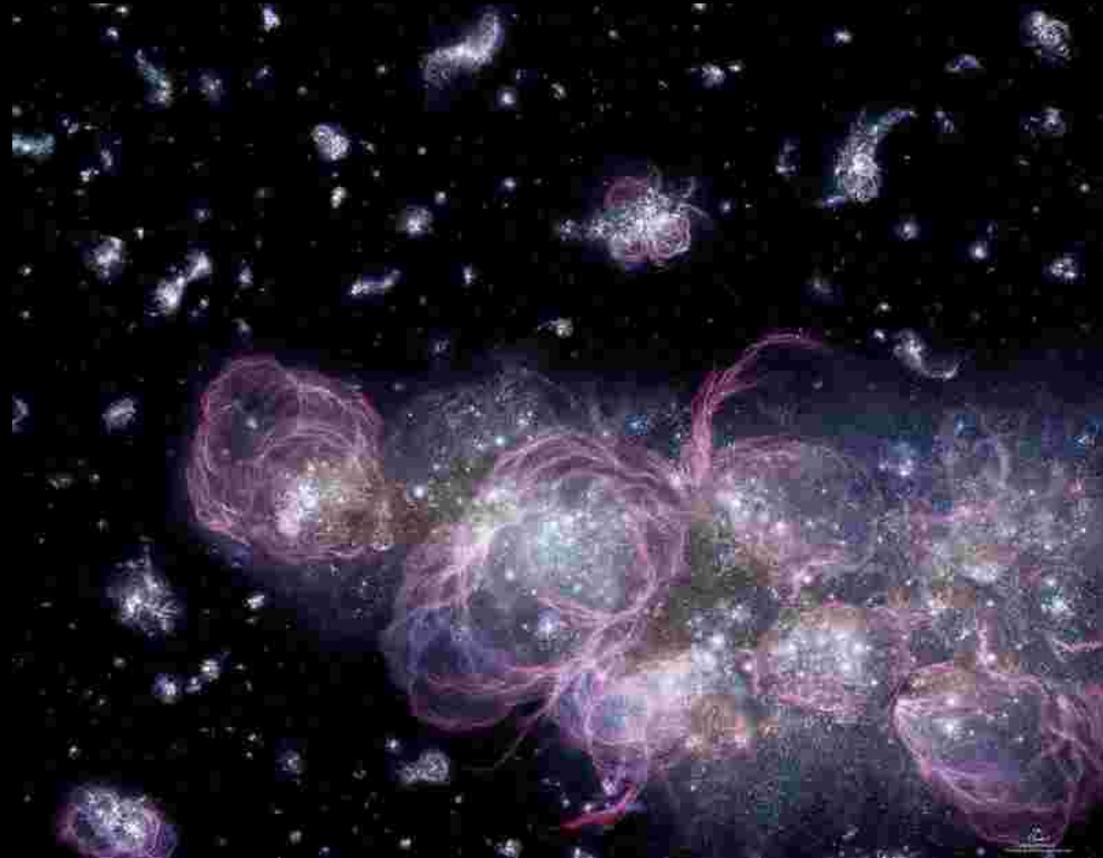
---

**Unité ASTR - 2, Chemin du Cyclotron - B-1348 Louvain-la-Neuve - Belgique**  
**☎ +32 (0)10 47 32 97      FAX : +32 (0)10 47 47 22**



sommaire :

- 1 recherches & observations
- 2 liaison redshift–expansion
- 3 hypothèse de l'atome primitif



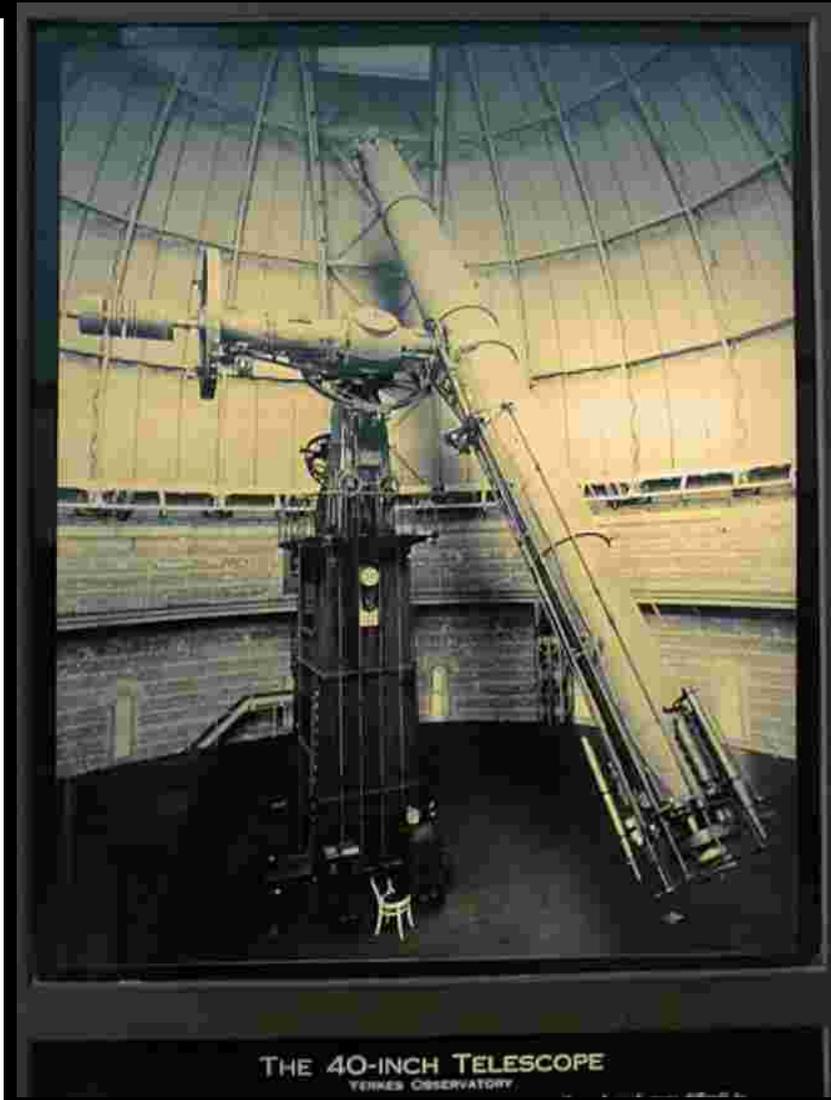
- 4 à la recherche du rayonnement fossile

# théories

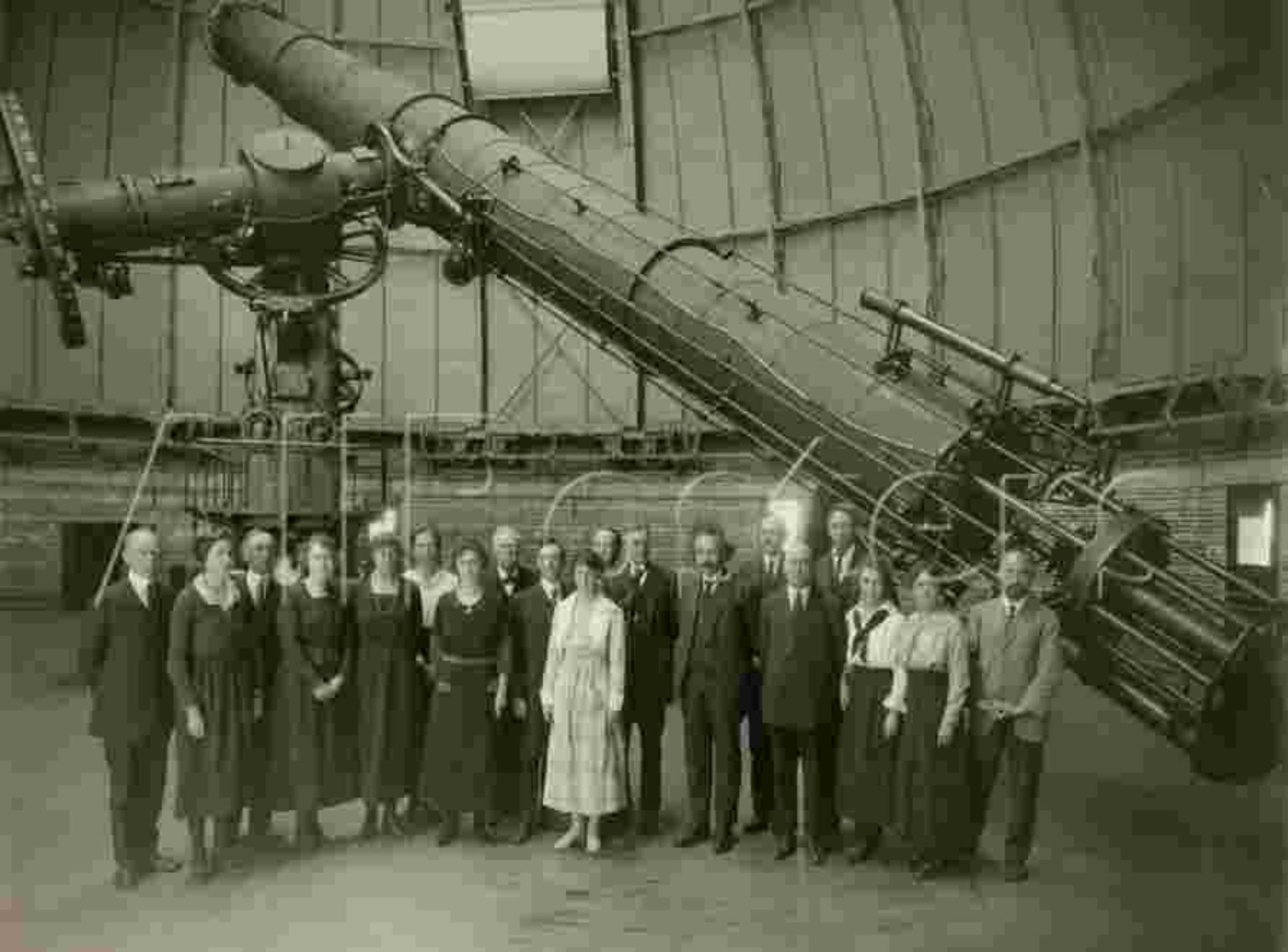
# 1

# observations

<b>GENERAL RELATIVITY</b>		UNIFORM ACCELERATION $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ $ds^2 = (cdt)^2 = (1 + \frac{g^2}{c^2})^2 (cdt)^2 - dl^2 \quad \eta = 1 + \frac{g^2}{c^2}$	
ACCELERATED CHARGE POWER $P = \text{Invariant Larmor Formula}$		SYNCHROTRON RADIATION $\theta = \frac{1}{\gamma}$	
$P = \frac{2q^2}{3c^3} \ddot{a} \cdot \ddot{a} = \frac{2q^2}{3c^3} \dot{a}' \cdot \dot{a}' = \frac{2q^2}{3c^3} (a_1'^2 + a_2'^2) = \frac{2q^2}{3c^3} \gamma^4 (a_1^2 + \gamma^2 a_2^2)$		$P = \frac{2q^2}{3c^3} \dot{a}^2 = \frac{2}{3} \frac{1}{m^2 c^3} \beta^2 \dot{\gamma}^2 e^4 B^2$	
$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi c^3}  a ^2 \sin^2 \theta$	$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi c^3} \frac{a_1^2 + \gamma^2 a_2^2}{(1 - \beta \cos \theta)^4} \sin^2 \theta$	$\omega = \frac{qB}{\gamma m_e}$ (SI) $\omega = \frac{qB}{\gamma m_e}$ (GGS) $r = \frac{\gamma m v}{qB}$ (SI) $r = \frac{\gamma m v c}{qB}$ (GGS)	
EQUIVALENCE PRINCIPLE		GRAVITATIONAL REDSHIFT	INVARIANT INTERVAL
$F = m_1 a = \frac{GMm_1}{x^2} \quad m_1 = m_0 \quad z_g = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{emit} - \lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = \frac{\lambda}{c} = \frac{gh}{c^2}$		$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$	$g_{\mu\nu} g^{\mu\nu} = I$ $g_{\mu\nu}$ & $g^{\mu\nu}$ are inverses
2D METRICS	CARTESIAN $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	CYLINDRICAL $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r^2 \end{pmatrix}$	SPHERICAL $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} R^2 & 0 \\ 0 & R^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$
MINNKOWSKI METRIC 4D PSEUDO-EUCLD		COVARIANT CONTRA-VARIANT	CHRISTOFFEL SYMBOLS (AFFINE CONNECTION)
$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$		PARALLEL TRANSPORT $\frac{dA^\alpha}{ds} + \Gamma_{\alpha\beta}^\gamma A^\beta \frac{dx^\alpha}{ds} = 0$	$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2g} [ \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jk}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^k} ]$
GEODESIC EQUATION $\frac{d^2 x^\alpha}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\gamma \frac{dx^\beta}{ds} \frac{dx^\alpha}{ds} = 0$		$\frac{dU^\alpha}{ds} = -\Gamma_{\alpha\beta}^\gamma U^\beta \frac{dx^\alpha}{ds}$	$SU^\alpha = -\Gamma_{\alpha\beta}^\gamma U^\beta \frac{dx^\alpha}{ds}$
COVARIANT DERIVATIVE $\frac{DA^\alpha}{dx^\sigma} = A^\alpha_{;\sigma} = \frac{\partial A^\alpha}{\partial x^\sigma} + \Gamma_{\sigma\beta}^\alpha A^\beta = A^\alpha_{,\sigma} + \Gamma_{\sigma\beta}^\alpha A^\beta$		DIVERGENCE $\nabla_\alpha f = \frac{1}{\sqrt{ g }} \partial_\alpha (\sqrt{ g } f)$ $\nabla_\alpha A^\alpha = \frac{1}{\sqrt{ g }} \partial_\alpha (\sqrt{ g } A^\alpha)$	
RIEMANN CURVATURE TENSOR $R^k_{ars} = \Gamma^k_{as,r} - \Gamma^k_{ar,s} + \Gamma^b_{ar} \Gamma^k_{sb} - \Gamma^b_{as} \Gamma^k_{rb}$		RICCI TENSOR $R_{ar} = R^k_{ar} k$	RICCI SCALAR $R = R^i_i$
260 COMPS ONLY TO NONZERO $R^a_{\beta\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\alpha\sigma} [g_{\sigma\nu,\beta\mu} - g_{\sigma\mu,\beta\nu} + g_{\beta\mu,\sigma\nu} - g_{\beta\nu,\sigma\mu}]$		$R^a_{bcd} + R^a_{cdb} + R^a_{dbc} = 0$	
EINSTEIN'S EQUATIONS $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$		EINSTEIN'S EA'S $\rightarrow$ FRIEDMANN EA'S $g_{\mu\nu} \rightarrow T^{\mu\nu} \rightarrow R_{\mu\nu} \rightarrow R_{\mu\nu} \rightarrow R^{\mu\nu}$	
WEAK FIELD $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$		$ds^2 = (cdt)^2 = (1 + \frac{2\phi}{c^2})(cdt)^2 - dl^2$ $g_{00} = 1 + \frac{2\phi}{c^2}$ $h_{00} = \frac{2\phi}{c^2}$ $\eta_{00} = 1$	
Schwarzschild Metric $ds^2 = (1 - \frac{r_s}{r})(cdt)^2 - (1 - \frac{r_s}{r})^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2 = (1 - \frac{r_s}{r})(cdt)^2 - (1 - \frac{r_s}{r})^{-1} dl^2$			
SCHWARZSCHILD RADIUS $r_s = \frac{2GM}{c^2}$		$d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2$ $dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$	
ROBERTSON-WALKER METRIC $ds^2 = (cdt)^2 = (cdt)^2 - a(t)^2 (\frac{1}{1-k^2} (dr^2 + r^2 d\Omega^2))$		$k=0$ FLAT $k=1$ CLOSED $k=-1$ OPEN $a(t) = \text{SCALE FACTOR}$	
NEWTON'S 2nd Law Weak Field Gravity $\frac{dp^i}{dt} = \frac{1}{2} g_{\alpha\beta,\mu} p^\alpha p^\beta \approx \frac{1}{2} h_{\alpha\beta,\mu} p^\alpha p^\beta$		WEAK GRAV. LENS $d_x = \frac{\Delta p_x}{p} = -2 \int \frac{\partial \phi}{\partial x} dz$ SAME FOR $dy$	
BENDING OF STARLIGHT PT. MASS $\alpha = \frac{2GM}{c^2 b}$		RELATIVISTIC GRAVITATIONAL WAVE POWER $\frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^5}  \ddot{Q} ^2 \sim \frac{G}{c^5} (\frac{M}{R})^2 v^6 \sim \text{LogM} (\frac{R_s}{R})^2 (\frac{v}{c})^6$	
BLACK HOLE TEMP $T_{BH} = \frac{h}{16\pi^2 G M k}$		$L_{CGW} = \frac{c^5}{G} = 3.63 \times 10^{57} \text{ erg/s}$ $L_{GW} = \frac{(L_{observed})^2}{L_{CGW}}$ $\alpha = 1.75''$ STARLIGHT BENT BY SUN	
BLACK HOLE ENTROPY $S_{BH} = \frac{k c^3}{16\pi^2 h G}$			



THE 40-INCH TELESCOPE  
YERKES OBSERVATORY



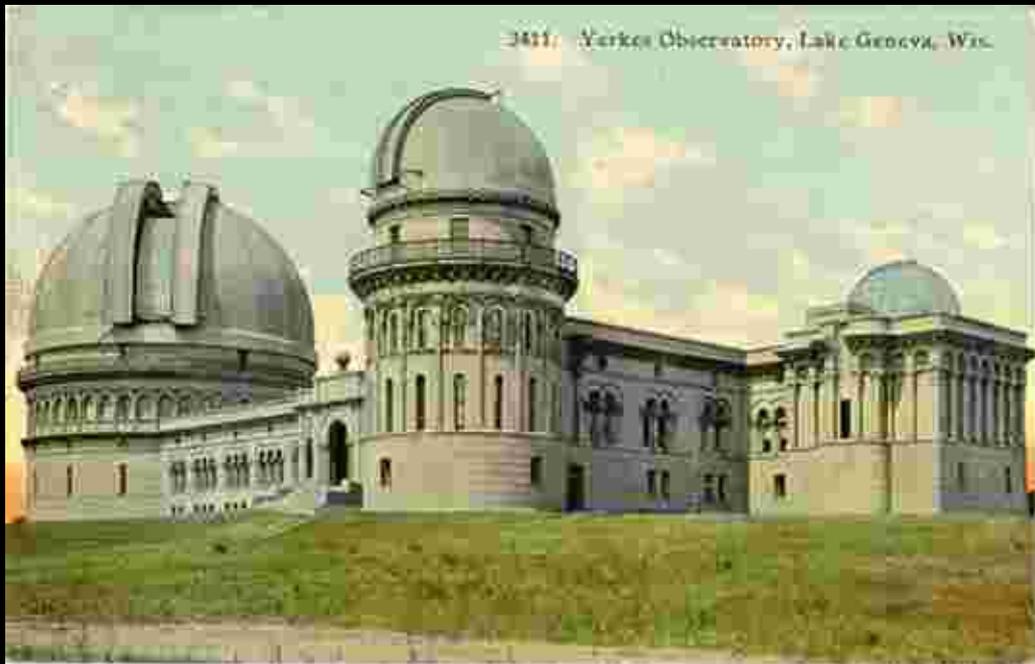
# YERKES OBSERVATORY

The University of Chicago

373 W. Geneva St, Williams Bay WI 53191 (Latitude 42 34.2, Longitude -88 33.4)



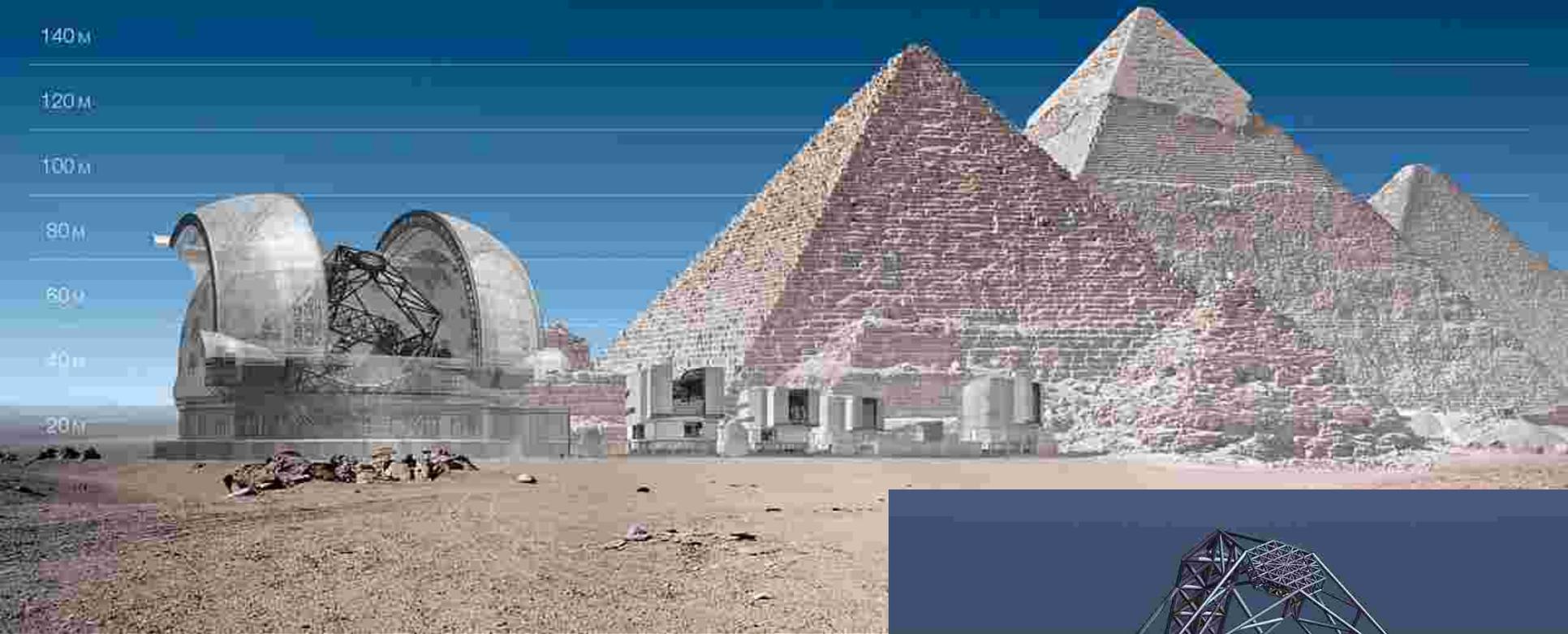
CHARLES T. YERKES  
CHICAGO,  
Financier.



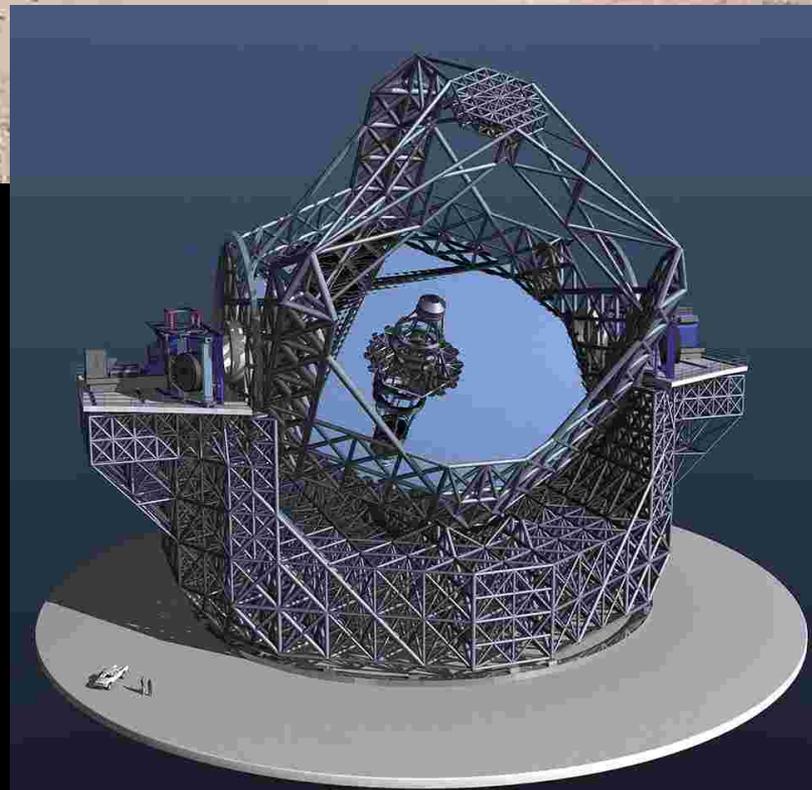








2022: l'E-ELT 42 m Galileo





1914 1919

Lemaître engagé volontaire  
Einstein à Berlin



## Sir Arthur Eddington 1882 1944

en 1904, il fut le premier étudiant de deuxième année à se classer Senior Wrangler au Tripos de mathématiques.

en 1915, secrétaire de la Royal Astronomical Society les articles sur la relativité générale d'Einstein et de de Sitter. Il commença à s'intéresser à ce sujet, notamment parce que cette nouvelle théorie pouvait fournir une explication à l'excès inexplicable de l'avance du périhélie de Mercure.

Eddington étudia aussi l'intérieur des étoiles et calcula leur température en se basant sur l'énergie nécessaire à contrer la pression exercée par les couches proches de la surface. Ce faisant, il découvrit la relation masse-luminosité des étoiles. Il calcula aussi l'abondance en hydrogène et élaborait une théorie expliquant la pulsation des variables céphéides. Le fruit de ses recherches est contenu dans son ouvrage *The Internal Constitution of Stars* (1926).

*En 1920, sur la base des mesures précises des atomes effectuées par Francis Aston, il fut le premier à suggérer que la source d'énergie des étoiles provenait de la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium.*

ANNALEN DER PHYSIK.  
VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. Die Grundlage  
der allgemeinen Relativitätstheorie;  
von A. Einstein.

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersteren „spezielle Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinaten klar erkannte und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel lagen fertig bereit in dem „absoluten Differentialkalkül“, welcher auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Christoffel über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und von Ricci und Levi-Civita in ein System gebracht und bereits auf Probleme der theoretischen Physik angewendet wurde. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandlung alle für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt vorauszusetzenden mathematischen Hilfsmittel in möglichst einfacher und durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein Studium mathematischer Literatur für das Verständnis der vorliegenden Abhandlung nicht erforderlich ist. Es sei es, des Mathematikers seine Hilfe nicht nur in der mathematischen Literatur erschaffen durch die Feldgleichungen

allgemeinen Relativitätstheorie (Hilfschrift: Annalen der Physik, vol

van Einstein, gepubliceerd in 1905, legt een verband tussen de twee referentiestelsels die t.o.v. elkaar in eenparige beweging verkeren uit te vinden. In deze theorie wordt de zwaartekracht gezien als een gevolg van de kromming van de ruimte-tijd. De algemene relativiteitstheorie is een geometrische theorie die zowel massa als energie de ruimte-tijd doen krommen.

Gleichungen der Grav. in erster Näherung (1)

$$-\left(\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2} + \dots - \frac{2\gamma_{\mu\nu}}{c^2} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2}\right) = K \rho_0 \frac{d\gamma_{\mu\nu}}{ds} \frac{dx^\mu}{dt} \quad ds^2 = dx^2 + \dots + c_0^2 dt^2$$

Statisches Feld

$$- \Delta \gamma_{44} = \frac{K \rho_0}{c^2} \quad \boxed{\kappa = K \frac{8\pi}{c^2}}$$

Tabelle des Schwerfeldes für eine nicht-rotierende

	$t$	$x$	$y$	$z$
$-t$	$0$	$0$	$0$	$0$
$0$	$-1$	$0$	$0$	$0$
$0$	$0$	$-1$	$0$	$0$
$0$	$0$	$0$	$1$	$0$
				$\frac{1}{c_0^2} \left(1 + \frac{A}{r}\right)$

$$\boxed{A = \frac{K M}{r}} = \frac{2 K M}{c_0^2}$$
  

$$g = -c_0^2 \left(1 + \frac{A}{r}\right)$$

Erweitern

$$\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2} + \dots - \frac{2\gamma_{\mu\nu}}{c^2} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2}$$

1)  $\sum \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$

2)  $0 \ 0 \ 0 \ 0$

3)  $\sum \gamma_{\alpha\beta} g_{\mu\nu} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$

$$-\frac{1}{2} \sum \gamma_{\alpha\beta} g_{\mu\nu} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$$

$$+\frac{1}{4} \gamma_{\mu\nu} g_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$$

Einstein



Schwarzschild + 1916

occuper Eddington pour le sauver de la guerre  
(ou de la prison)



Dyson



Eddington





1684

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$



Newton's fixed space

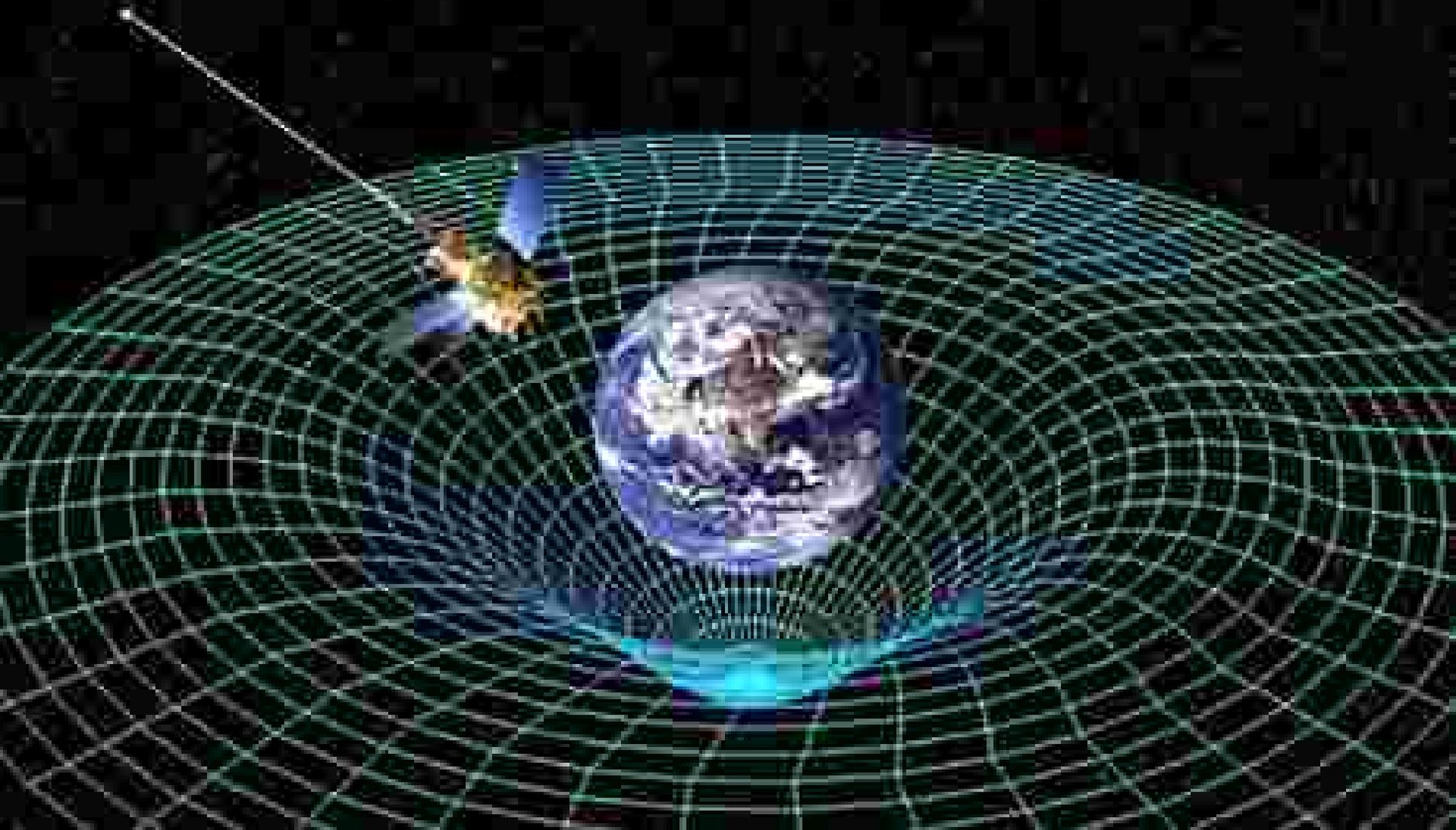
1916

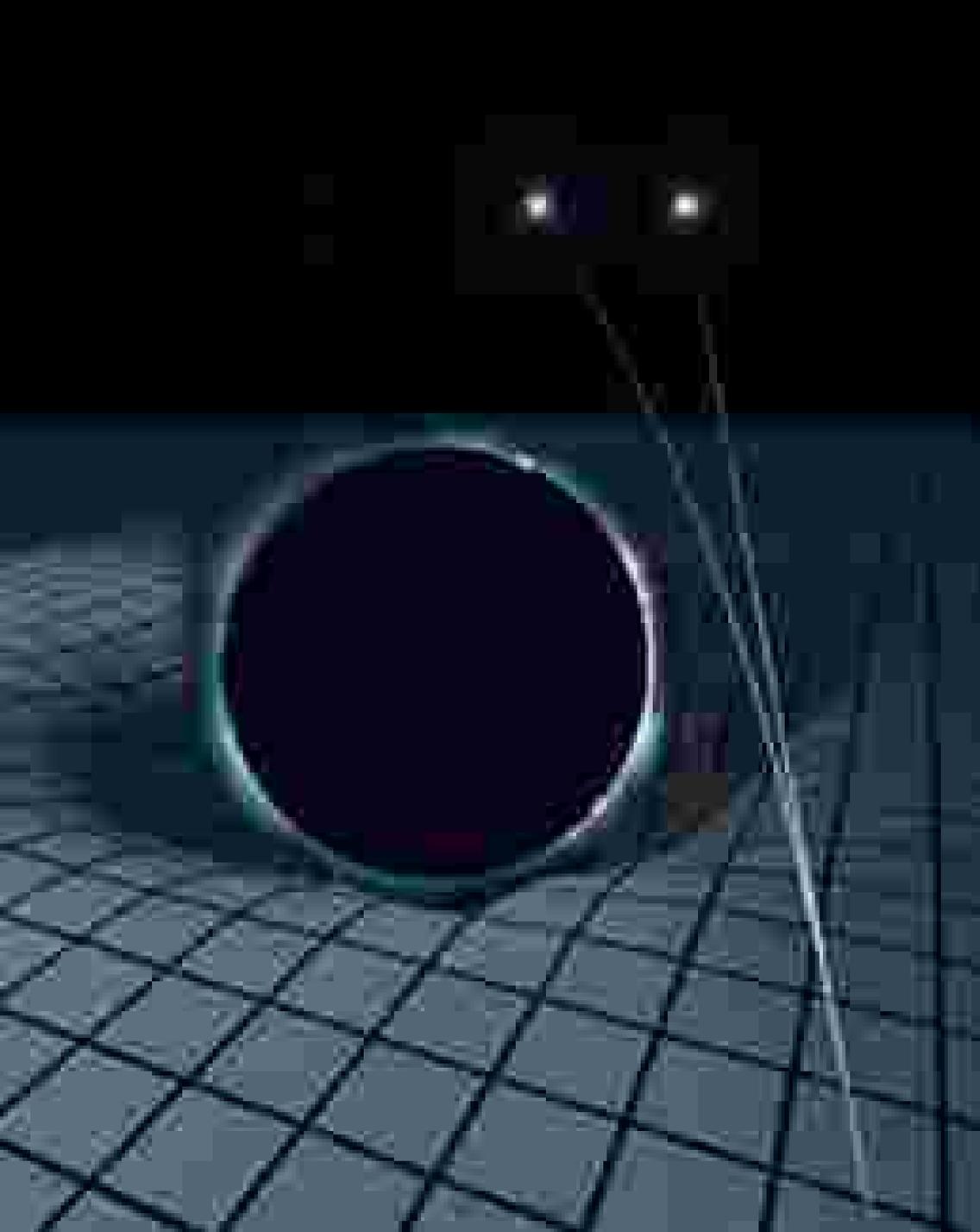
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



Einstein's flexible space-time

courbure de l'espace-temps par les masses





Einstein a une idée pour réaliser  
une preuve:  
courbure des rayons lumineux  
entraînant une illusion d'optique  
pour l'observateur



# détection de la courbure

Zürich, 14.5.1912

Amis  
 Hoch geehrter Herr Kollege!

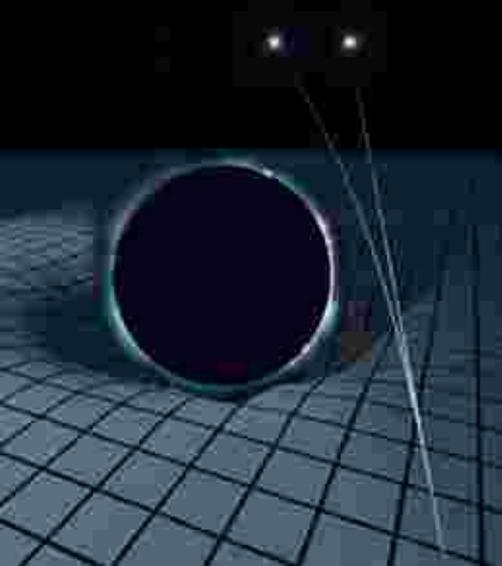
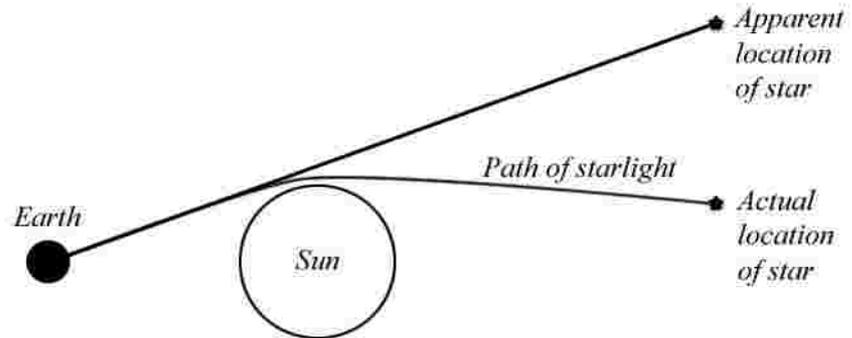
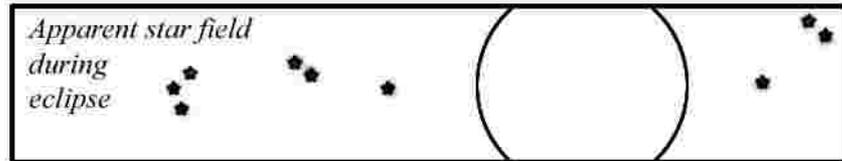
Ihre einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfeld eine Parabelbahn beschreiben.

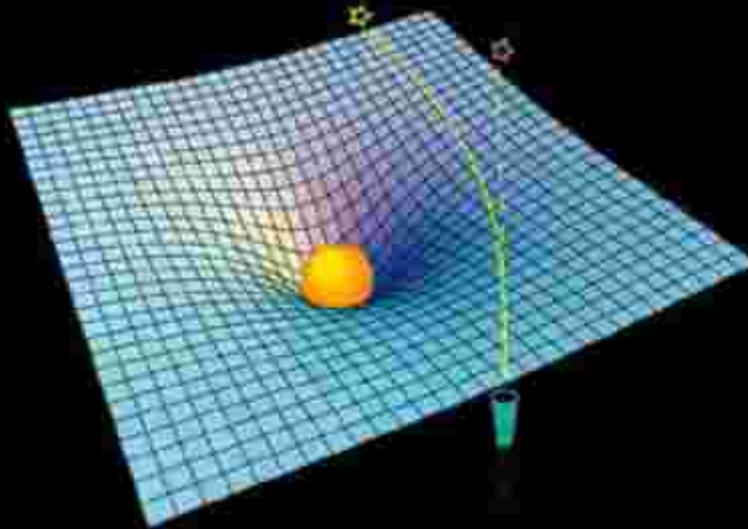

  
 Lichtstrahl

An Sonnenscheibe müsste diese Ablenkung  $0,84''$  betragen und wie  $\frac{1}{2}$  abnehmen (R. Schumacher'sches Mittelmaß).


  
 $0,84''$

Es wäre deshalb von größtem Interesse, bei der nächsten Sonnenfinsternis bei Anwendung der stärksten Vergrößerungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.





déviations calculées :  
1,75 ''

### 3.9. Métrique de Schwarzschild

On cherche une solution des équations d'Einstein qui soit stationnaire et isotrope dans le vide au voisinage d'une masse  $M$  (cette masse peut être ponctuelle, ou à symétrie sphérique). On peut montrer que la seule solution est donnée de façon simple évidemment en coordonnées sphériques selon (Schwarzschild 1916) :

$$(3.9.1) \quad ds^2 = \left[1 - \frac{2GM}{r}\right] dt^2 - \left[1 - \frac{2GM}{r}\right]^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\varphi.$$

En développant les géodésiques (Eq. 3.4.2) dans cette métrique, on peut montrer que les rayons lumineux venant de l'infini sont déviés lorsqu'ils passent au voisinage (à la distance  $R$ ) de la masse  $M$  par un angle total de :

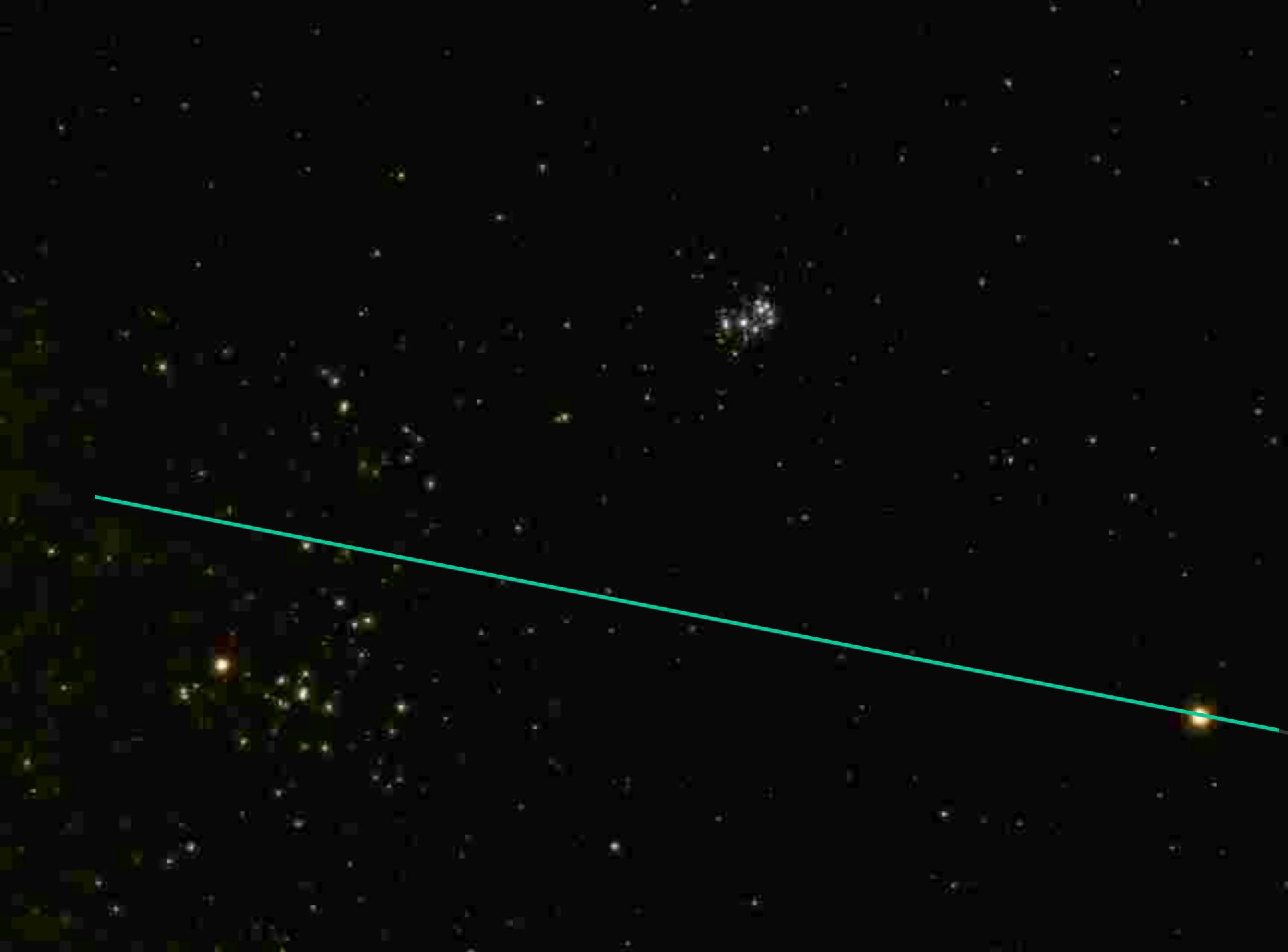
$$(3.9.2) \quad \alpha = \frac{4MG}{c^2 R} = 1.75'' \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-1}.$$

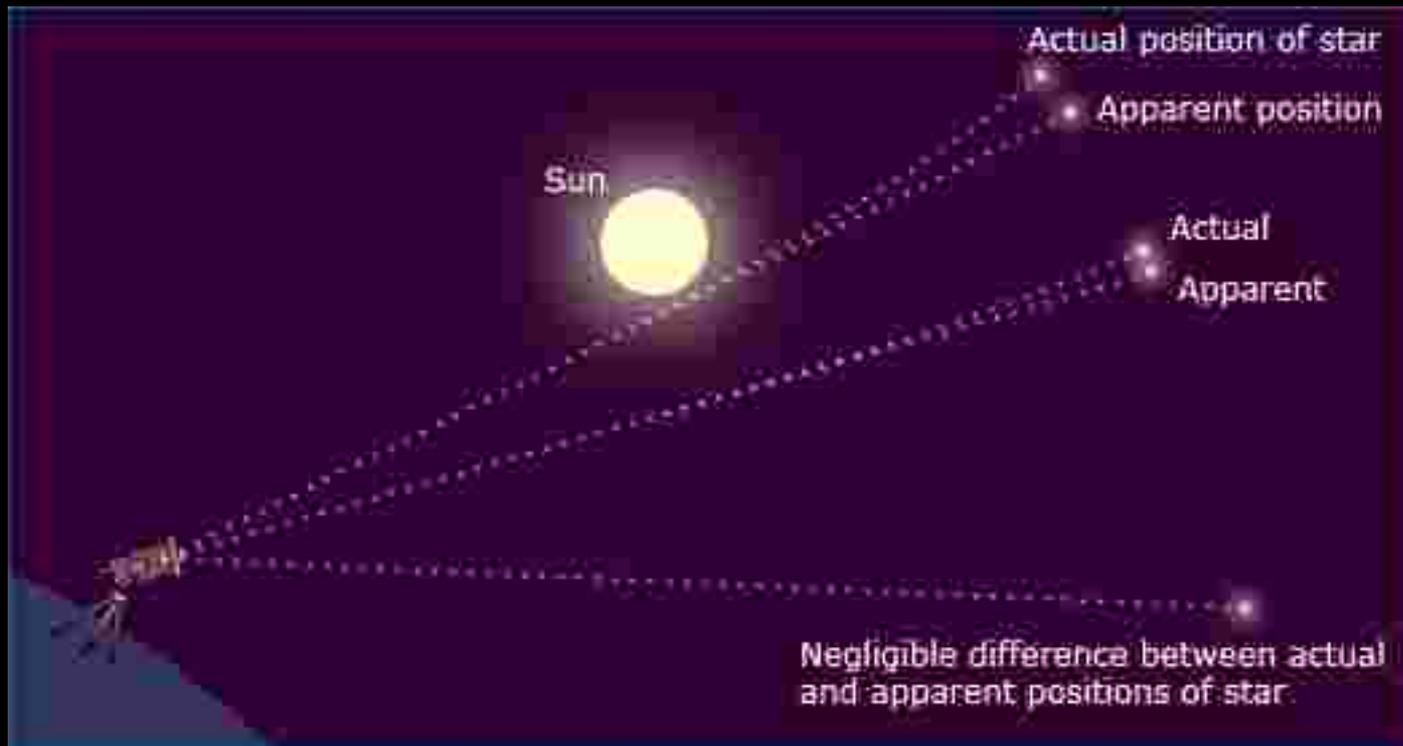
il faut trouver un **amas ouvert grand champ** près de l'écliptique

# l'amas ouvert des HYADES



écliptique





1918 préparatifs repérages

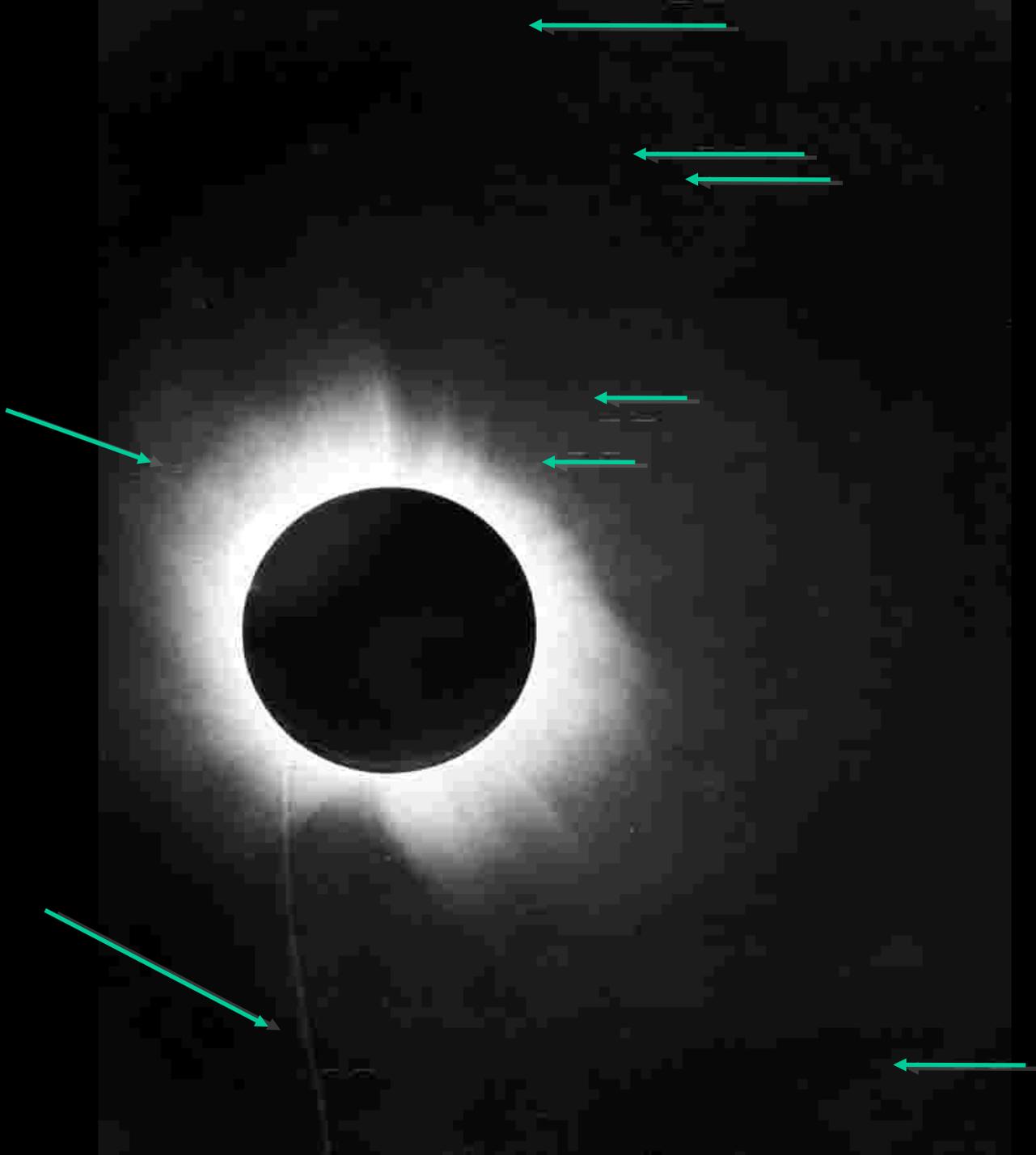


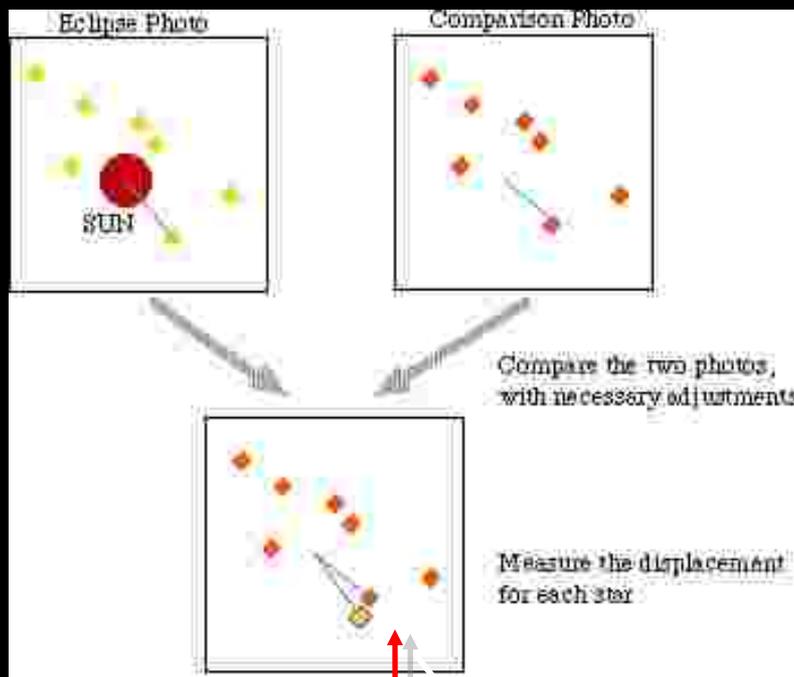
on démonte la lunette de Greenwich



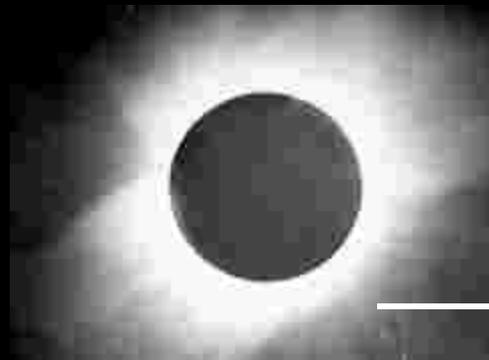
mai 1919  
expédition Eddington-Crommelin  
au Brésil et à l'île de Principe





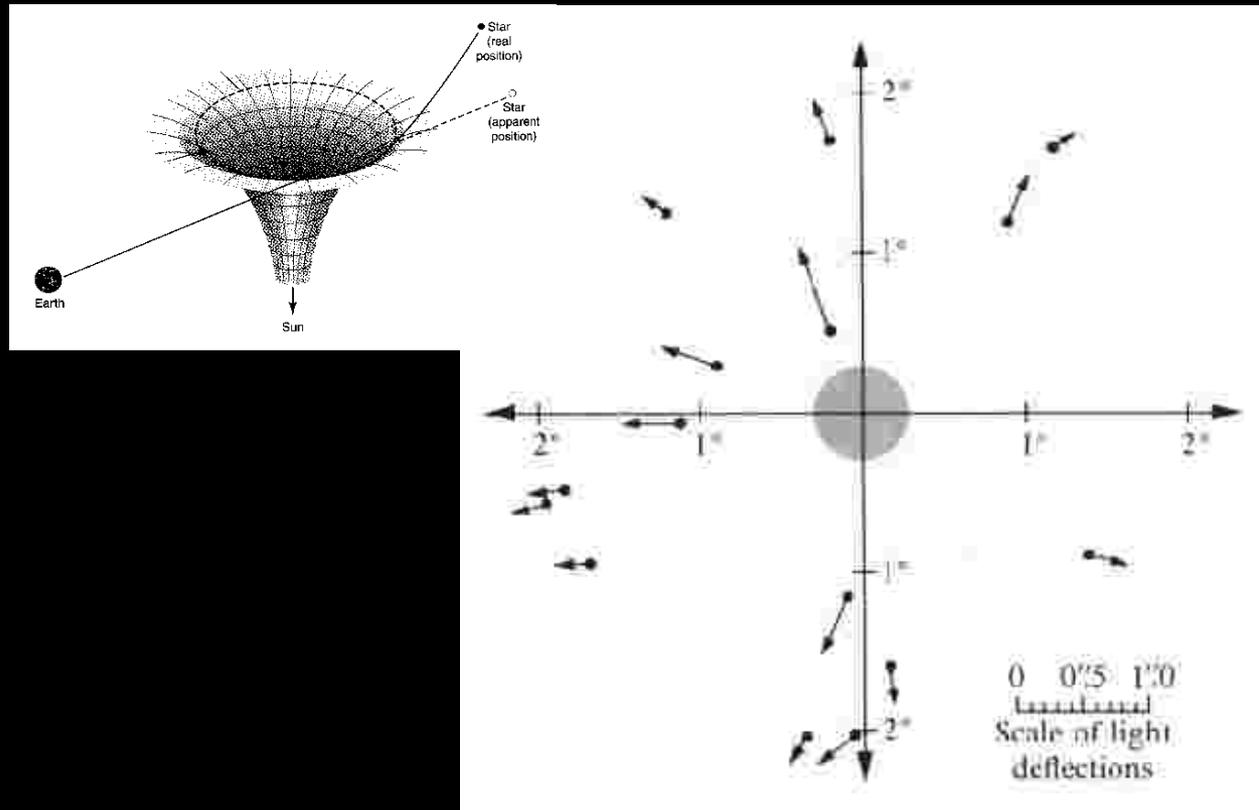


superposition des plaques photo  
avant et pendant l'éclipse



déviatiion calculée = 1.75 "

# le 29 mai 1919 les HYADES sont près de l'écliptique à 12 h07



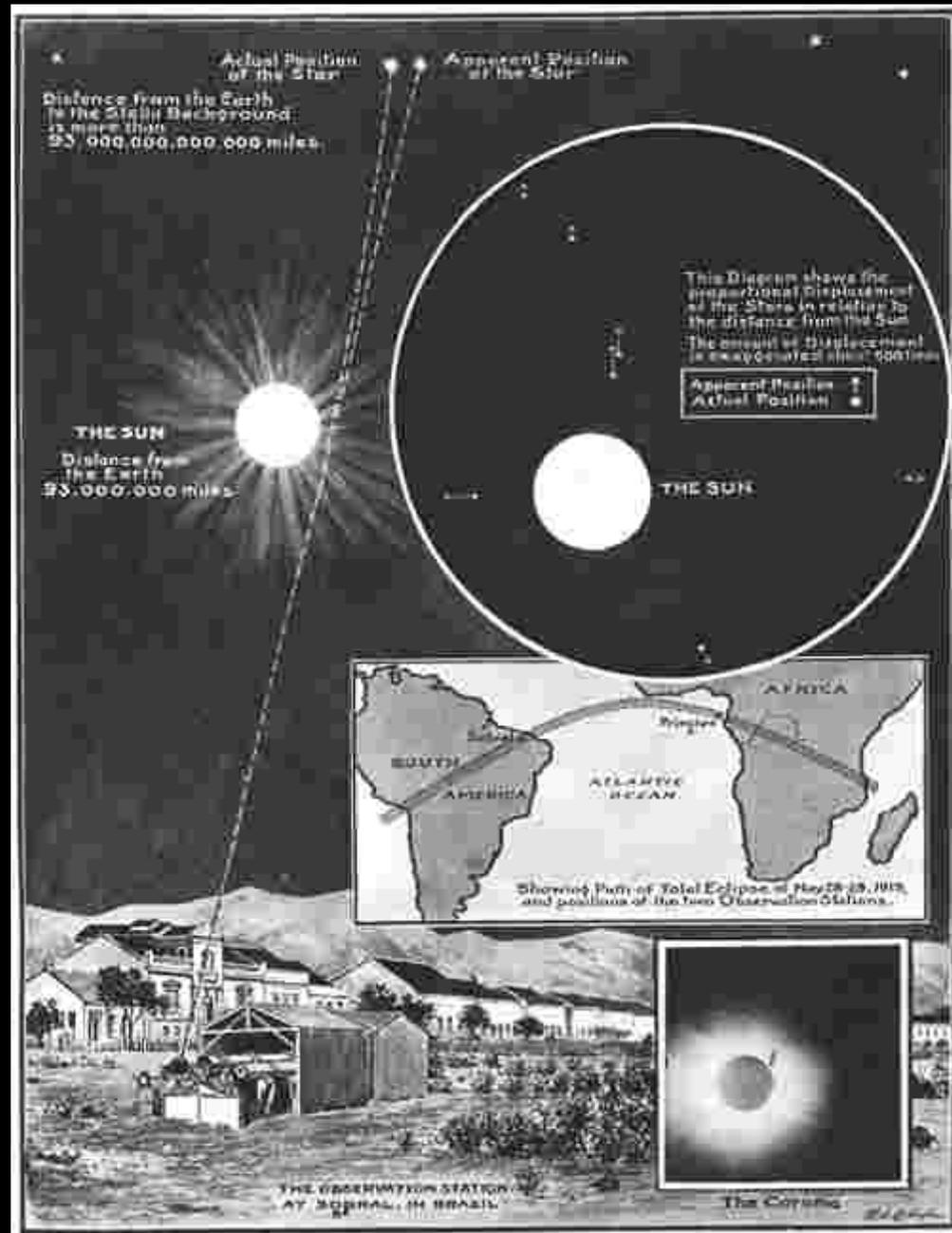
14 déviations dans  
toutes les directions

les déviations sont de  $1'98 \pm 0.12$  pour Sobral et  $1'61 \pm 0.3$  pour Principe.

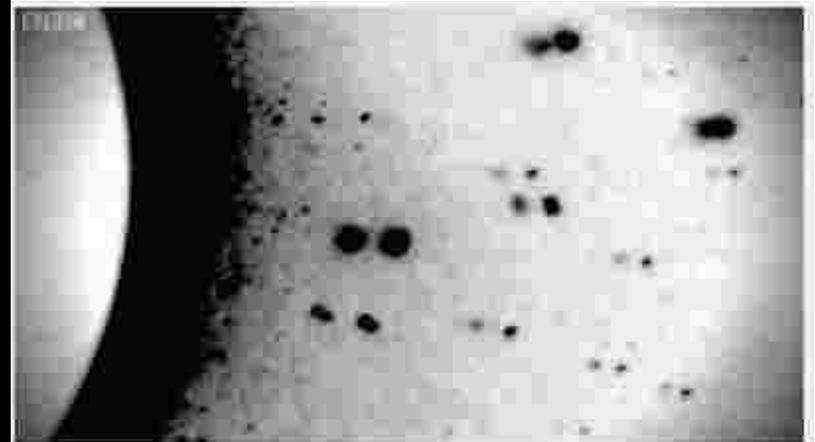
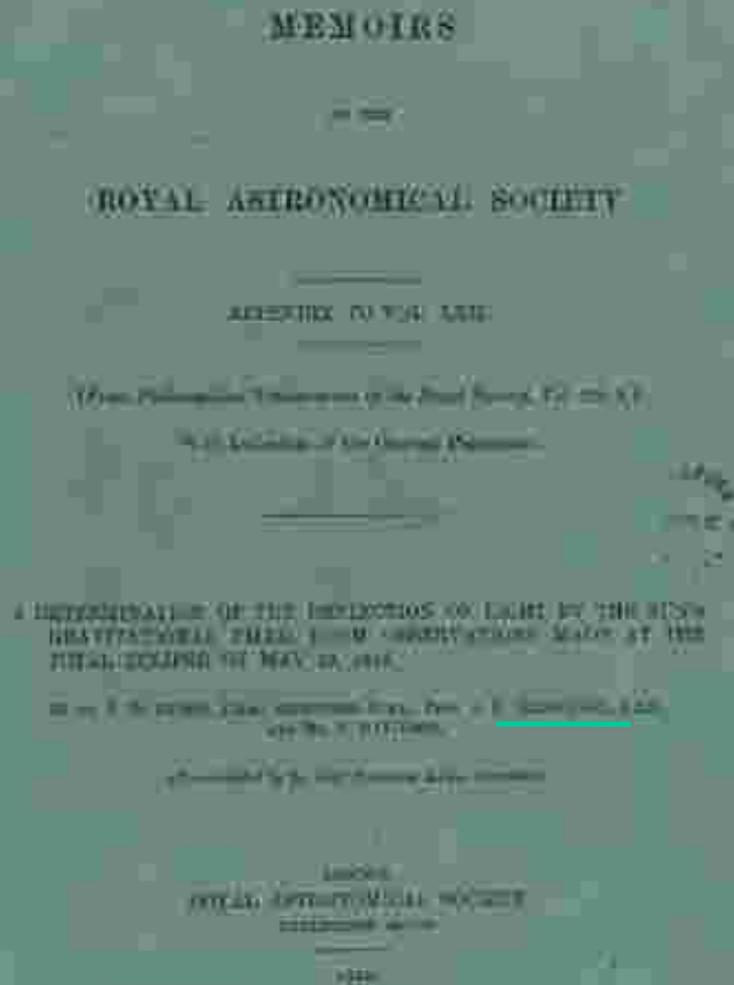


mai 1919  
 démobilisé

Lemaître lit le journal:  
 le déclic



« ...une plaque que j'ai mesurée donnait des résultats en accord avec Einstein »



The denouement of the drama: the eclipse plate superimposed on the comparison plate shows outward displacements of stars near the sun. Note that the programme-makers have vastly exaggerated both the number of stars that were visible in the eclipse plates and the size of the displacement—the latter by a factor of at least 50 times, making the detection of the displacement into a trivial observation rather than a masterpiece of measurement.

Star	$\Delta_{\alpha}$	$\Delta_{\delta}$	$\Delta_{\alpha}$	$-\Delta_{\alpha}$	$\Delta_{\delta}$	$\Delta_{\delta}$	Resid.
5	5020	4923	5052	-32	5160	5166	+ 66
4	4722	4490	4547	-263	5100	5127	+ 27
3	4122	3302	4161	-39	5089	5015	-74
6	4620	4222	4328	-108	5075	5075	0
10	3744	4420	4491	-81	5255	5219	-36

Star	$\Delta_{\alpha}$	$\Delta_{\delta}$	$+\Delta_{\alpha}$	$\Delta_{\delta}$	$\Delta_{\alpha}$	$\Delta_{\delta}$	Resid.
5	-6804	-7001	372	-7123	-127	-7296	- 15
4	-5751	-6035	529	-7125	+ 354	-7269	-109
3	-5679	-6451	524	-6973	+ 273	-7247	+ 34
6	-5420	-6076	646	-7172	+ 124	-7298	- 27
10	-5109	-6271	678	-7049	+ 114	-7163	+139

How they really did it: the computation of residual displacements in two dimensions for 5 stars based on a comparison between Principe plate W and Oxford plate D, from page 324 of Eddington's 1920 paper.

**REVOLUTION IN  
SCIENCE**

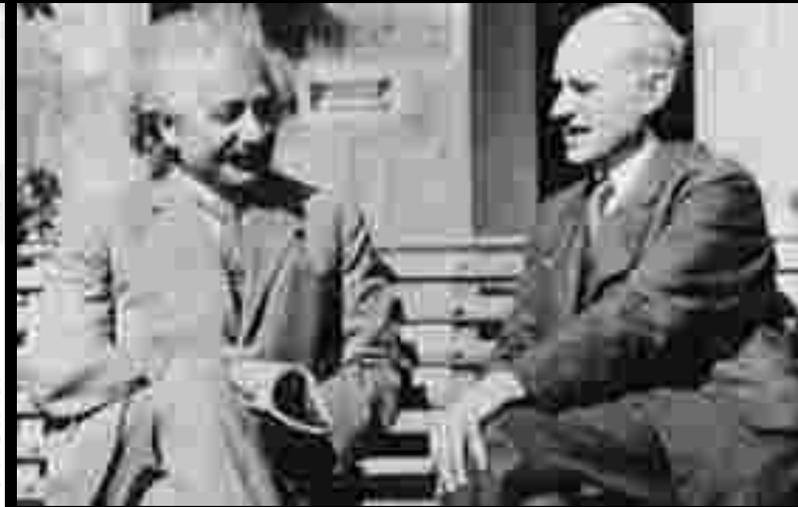
---

**NEW THEORY OF THE  
UNIVERSE.**

---

**NEWTONIAN IDEAS  
OVERTHROWN.**

Yesterday afternoon in the rooms of the Royal Society, at a joint session of the Royal and Astronomical Societies, the results obtained by British observers of the total solar eclipse of May 29 were discussed.



**le 6 novembre 1919 à Londres, sir Joseph John Thomson.**

» Après une étude soigneuse des plaques, je suis prêt à déclarer qu'il n'y a aucun doute qu'elles confirment les prédictions d'Einstein. Un résultat tout à fait certain a été obtenu selon lequel la lumière est défléchie en accord avec la loi de gravitation d'Einstein ».

( Join Eclipse Meeting 6 nov 1919 p.391 ).

le Times de Londres titra le 7 novembre, page 12, « Révolution scientifique : les idées de Newton détrônées », puis « l'espace est tordu ».

le 9 novembre le New York Times titra :  
« Triomphe de la théorie d' Einstein :  
les étoiles ne sont pas là on l'on croit, mais inutile de s'inquiéter ... ».

# LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less  
Agog Over Results of Eclipse  
Observations.

## EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed  
or Were Calculated to be,  
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could  
Comprehend It, Said Einstein When  
His Daring Publishers Accepted It.

Special Cable to THE NEW YORK TIMES.

LONDON, Nov. 9.—Efforts made to put in words intelligible to the non-scientific public the Einstein theory of light proved by the eclipse expedition so far have not been very successful. The new theory was discussed at a recent meeting of the Royal Society and Royal Astronomical Society. Sir Joseph Thomson, President of the Royal Society, declares it is not possible to put Einstein's theory into really intelligible words, yet at the same time Thomson adds:

"The results of the eclipse expedition demonstrating that the rays of light from the stars are bent or deflected from their normal course by other aerial bodies acting upon them and consequently the inference that light has weight form a most important contribution to the laws of gravity given us since Newton laid down his principles."

Thompson states that the difference between theories of Newton and those of Einstein are infinitesimal in a popular sense, and as they are purely mathematical and can only be expressed in strictly scientific terms it is useless to endeavor to detail them for the man in the street.



ROYAL OBSERVATORY, GREENWICH

# SPACE TIME AND GRAVITATION

AN OUTLINE OF THE GENERAL  
RELATIVITY THEORY

BY

S. EDDINGTON, M.A., M.Sc., F.R.S.

LEWIS PROFESSOR OF ASTRONOMY AND EXPERIMENTAL  
PHYSICS, CAMBRIDGE

CAMBRIDGE  
AT THE UNIVERSITY PRESS  
1921

auteur, Arthur S.  
titel, Space Time  
publicatiejaar  
plaats van uitgeverij  
tekst:

Arthur Stanley E.  
volle betekenis v  
expeditie naar h  
Zo kon hij zonn  
zwaartekracht v  
relativiteitstheo  
Op de foto in be  
telescopen en es  
weerkaatst.



## Einstein écrit à sa mère la nouvelle de l'expédition de Sobral

Liebe Mutter!

Heute eine glänzende Nachricht. H. A. Lorentz hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung in der Sonne wirklich bewiesen haben. Maja schreibt mir leider, dass Du nicht nur viel Schmerzen hast, sondern dass Du Dir auch noch trübe Gedanken machst. Wie gerne würde ich Dir wieder Gesellschaft leisten, dass Du nicht dem hässlichen Gähnen überlassen wärest! Aber ein Weile werden ich doch hier bleiben müssen und arbeiten. Auch nach Holland werde ich für einige Tage fahren, um mich amferst dautsche zu überzeugen, obwohl der Zeitverlust recht schmerzhaft ist.

Ich wünsche Dir von Herzen gute Tage. Sei mir viel gegrüßt von deinem Albert

Dear Mother,

I have good news for you today. H. A. Lorentz has cabled to say that the English expedition has really proved that light is deviated by the Sun. I am sorry to hear from Maja that not only are you in a lot of pain, but also thinking gloomy thoughts.

How much I would love to keep your company again so that you will not abandon yourself to that horrible melancholy. However, I have to stay on here for a while and work.

I will also go to Holland for a couple of days to prove my gratitude to Ehrenfest, although that is quite painful.

I send you all my love,

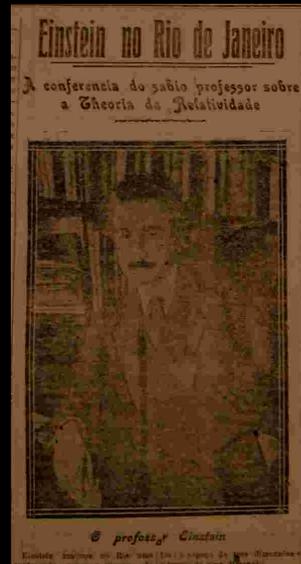
Warmest regards  
Your Albert



1922 SEPT. 21  
LICK ASTR. OBSERVATORY

confirmation lors de l'éclipse du 22 septembre 1922  
à Wollal en Australie

Einstein: bravo les photographes !



Mai 1925 Einstein au Brésil

# fin de la guerre **des études ad hoc**

## 1 physique mathématique et astronomie

après l'Ecole des Mines

professeurs: Alliaume ( dont il héritera des chaires en 1931 )

De Donder correspondant de

Einstein, De Sitter, ami d'Eddington

des maths

géométrie différentielle de Riemann  
variété différentielle fct multiformes  
un point a plusieurs images  
calcul tensoriel quaternions

de l'astro

mécanique céleste de Laplace  
relativités avec De Donder  
astrophysique  
amas céphéïdes

du calcul  
numérique

approximation des fonctions  
méthode Runge Kutta  
intégration des équations  
différentielles par itération



# 1920 thèse de doctorat en mathématiques

directeur: baron Charles de la Vallée Poussin

démonstration de la conjecture de Riemann  
sur les 0 de la fonction

$$\sum_{p=1}^n \frac{1}{p^s} = 1 + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \dots + \frac{1}{n^s} < 1 + \int_1^n \frac{1}{x^s} dx = \frac{n^{1-s} - s}{1-s}$$

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

ces séries convergent pour  $s > 1$  et divergent sinon

lorsque la partie réelle de  $s$  est entre 0 et 1 les zéros de  $\zeta(s)$  ont tous  $\frac{1}{2}$  pour partie réelle

copie blanche de Lemaître (théorème de Pythagore !) en 2000 1.000.000\$ de récompense

**théorème de La Vallée Poussin:**

proximation des fonctions  $f(x)$  d'une variable réelle  
( méthode de Weierstrass et Landau )

polynômes convergent uniformément vers  $f(x)$  :

intégration du produit de  $f(x)$

ne fonction  $K(x,u)$  a croissance raide vers un maxi  $x=u$

$K(x,u) = (1 - (u-x)^2)$  ( théorème de Pythagore ! )



« approximation des fonctions à plusieurs variables réelles par des  
« polynômes ou des expressions trigonométriques »



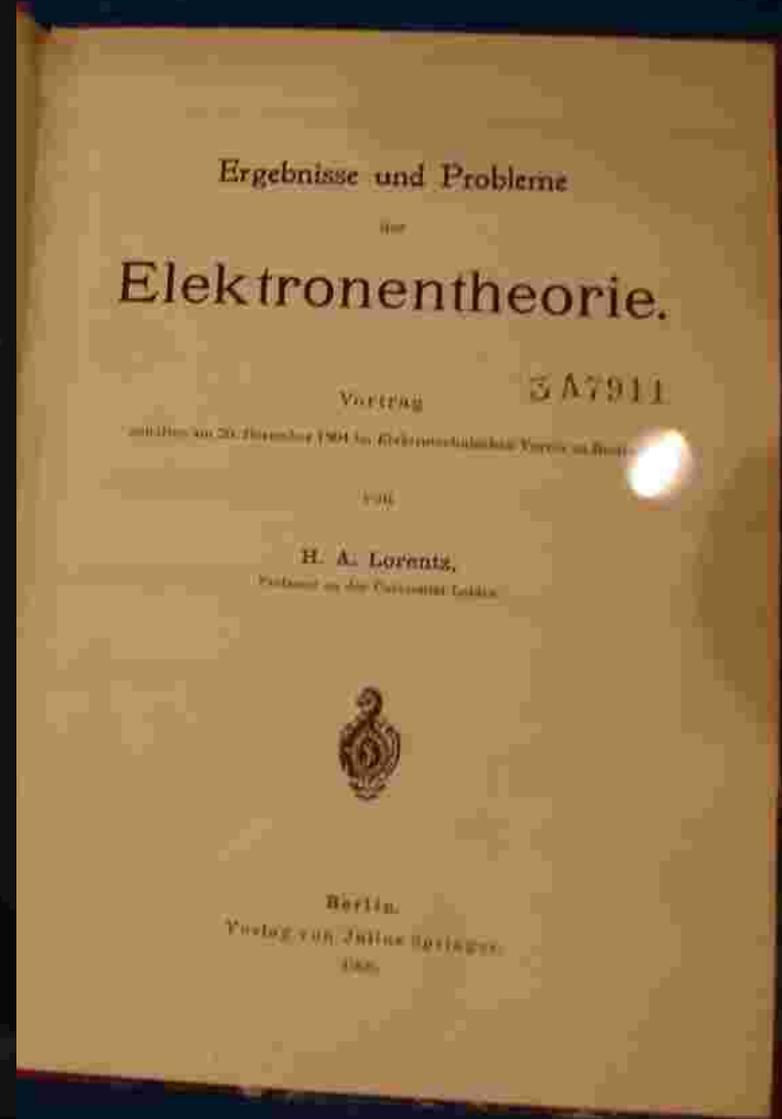
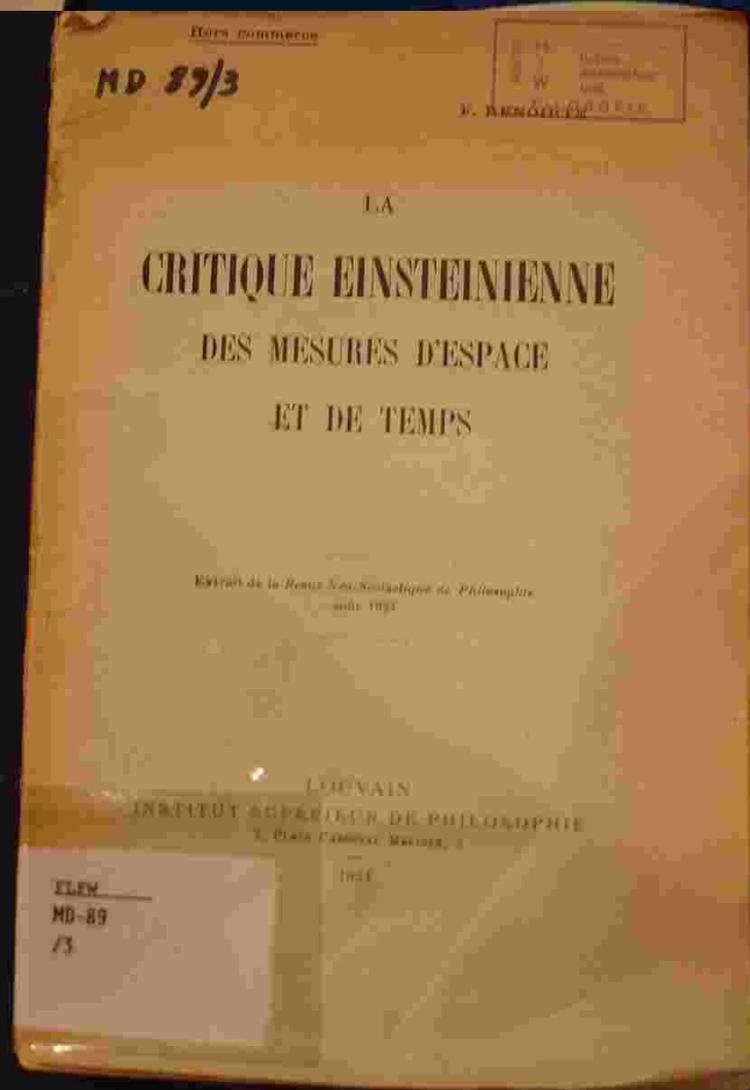
1920 séminaire maison Saint-Rombaut de Malines

il opte pour une philosophie thomiste:  
St Thomas d'Aquin considère un commencement  
et non une création





ouvrages consultés et approfondis par Lemaître



comment concilier

la mécanique avec les travaux de Maxwell sur l'électromagnétisme (1873),

en respectant le principe de Galilée: les lois de la physique sont les mêmes dans tout l'Univers (référentiels)

et, depuis l'expérience de Michelson Morley (1887), la vitesse de la lumière est invariante partout



prix Nobel 1922 ...  
pour son explication de l'effet photoélectrique !

1917 Einstein modifie ses équations de champ

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

l'Univers est l'objet physique constitué par l'ensemble de l'espace-temps

COSMOLOGICAL CONSIDERATIONS ON THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY

A. EINSTEIN

translated from "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie," Sitzungsberichte der Preussischen Akad. d. Wissenschaften, 1917.

la RG met en équations l'E-T donc l'Univers  
l'E-T dépend de la matière-énergie  
idée folle: que se passe-t-il si il n'y a plus de matière?  
comment un seul atome peut-il structurer à l'infini l'Univers ?  
principe de Mach : champ décrit par le tenseur g est fixé par les masses

l'E-T était-il là avant la matière?  
Einstein fixe U à densité constante et figée dans le temps= pas de solutions donc il rajoute

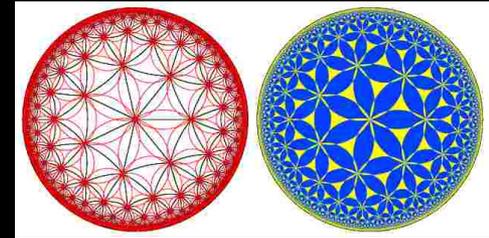
$$E = 4 G \rho c^2$$

# 1921-22 la physique d'EINSTEIN au séminaire

par dérogation

Alliaume lui porte des ouvrages dont :

- « la gravifique einsteinienne » de De Donder
- « la traduction de « Espace, Temps, Gravitation » d'Eddington
- « Exposé élémentaire de la théorie d'Einstein » de Jacques Becquerel
- « les équations du champ de gravitation d'Einstein » Vanderlinden
- « trajectoires d'un rayon lumineux dans le champ Schwarzschild



il devint membre de

la **Société Scientifique de Bruxelles** ( fondée par les groupes Cauchy )  
qui publiait: les « Annales » et la « Revue des questions scientifiques »  
G.Lemaître publiera ses découvertes dans ces revues !

---

G.Lemaître rédige un mémoire-synthèse personnelle

la physique d'EINSTEIN inédit de 131 pages terminé le 31 mai 1922

intégrant la géométrie, la gravitation et l'électricité

Table des matières

Chapitre I. L'espace et le temps . . . . .	230
§ 1. La géométrie de Riemann . . . . .	230
§ 2. Le temps et la mécanique . . . . .	241
§ 3. La simultanéité et l'espace . . . . .	248
§ 4. Les mesures indirectes d'espace et de temps . . . . .	254
Chapitre II. Les champs de force . . . . .	263
§ 5. Le champ d'inertie et de gravitation . . . . .	265
§ 6. Les champs électriques . . . . .	277
Chapitre III. Production des champs par mouvement relatif . . . . .	286
§ 7. Le mouvement uniformément accéléré . . . . .	286
§ 8. Rotation uniforme . . . . .	295
§ 9. Les équations générales des champs d'inertie . . . . .	301
Chapitre IV. La gravitation . . . . .	316
§ 10. Potentiel newtonien et potentiel retardé . . . . .	316
§ 11. Le tenseur d'énergie matérielle . . . . .	320
§ 12. Équations générales de la mécanique et de la gravitation . . . . .	328
§ 13. Applications astronomiques . . . . .	334
§ 14. Les étoiles fixes . . . . .	347
Chapitre V. Les masses électriques . . . . .	352
§ 15. Équations générales de l'électricité . . . . .	

un plan nouveau :  
mise en perspective  
avec  
la géométrie  
et la matière

LEMAÎTRE parle  
de matière ( électricité )  
et annonce une liaison avec  
la cosmologie



édité en 1994 par ses anciens élèves

ou en tenant compte des équations de la gravitation

$$(3) \quad R_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$

$$(4) \quad g_{\mu\nu} = \frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T}{r} d\xi d\eta d\zeta$$

On pourra généralement négliger le retard dans le calcul des potentiels, la vitesse des astres étant petite par rapport à la vitesse-unité (vitesse de la lumière).

Rappelons la définition de  $T_{\mu\nu}$

$$\begin{aligned} T_{\mu\nu} &= \sum_{\sigma} \sum_{\tau} g_{\mu\sigma} g_{\nu\tau} T^{\sigma\tau} \\ &= \frac{\rho}{\sqrt{-g}} \sum_{\sigma} \sum_{\tau} g_{\mu\sigma} g_{\nu\tau} \frac{\partial x_{\sigma}}{ds} \frac{\partial x_{\tau}}{ds} \end{aligned}$$

Les vitesses des astres étant petites, nous pourrions poser

$$\frac{dx_1}{ds} = \nu_x, \quad \frac{dx_2}{ds} = \nu_y, \quad \frac{dx_3}{ds} = \nu_z, \quad \frac{dx_4}{ds} = \sqrt{1 - \nu^2}$$

En particulier lorsque les vitesses  $\nu_x, \nu_y, \nu_z$  des astres sont nulles ou négligeables,  $T_{\mu\nu}$  se réduit à

$$T_{\mu\nu} = \frac{\rho}{\sqrt{-g}} g_{\mu 4} g_{\nu 4}$$

Si  $\kappa$  est une quantité petite, et nous verrons de suite qu'il en est bien ainsi, nous pouvons dans la résolution des équations (4) remplacer sous le signe intégrale  $g_{\mu\nu}$  par les valeurs approchées tirées de (1) que nous appelons  $\delta_{\mu\nu}$

$$\delta_{\mu\nu} = \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

les  $T_{\mu\nu}$  sont alors nuls sauf

$$T_{44} = \rho$$

## Chapitre V. Les masses électriques

[p. 123] La définition du champ électromagnétique par le mouvement qu'il communique à des particules électrisées, a été étudiée au § 6. Nous avons ainsi donné aux lois qui expriment l'action des champs sur les masses une forme indépendante du mode de repérage utilisé pour étudier les phénomènes.

Il est facile de se rendre compte que les quantités que nous avons introduites alors sont des tenseurs.

Nous avons considéré en plus que l'invariant  $ds$ , un autre invariant

$$\varphi_1 dx_1 + \varphi_2 dx_2 + \varphi_3 dx_3 + \varphi_4 dx_4 = \sum_{\alpha} \varphi_{\alpha} dx_{\alpha}$$

Les potentiels électromagnétiques  $\varphi_{\sigma}$  se transforment, lorsqu'on fait un changement de coordonnées, par des équations de la forme

$$(1) \quad \varphi'_{\sigma} = \sum_{\alpha} \frac{\partial x_{\alpha}}{\partial x'_{\sigma}} \varphi_{\alpha}$$

C'est en cela que consiste le caractère tensoriel d'un covariant  $\varphi_{\sigma}$ . Le champ électro-magnétique

$$(2) \quad F_{\mu\nu} = \frac{\partial \varphi_{\mu}}{\partial x_{\nu}} - \frac{\partial \varphi_{\nu}}{\partial x_{\mu}}$$

est aussi un tenseur. On a en effet

$$F'_{\mu\nu} = \frac{\partial \varphi'_{\mu}}{\partial x'_{\nu}} - \frac{\partial \varphi'_{\nu}}{\partial x'_{\mu}}$$

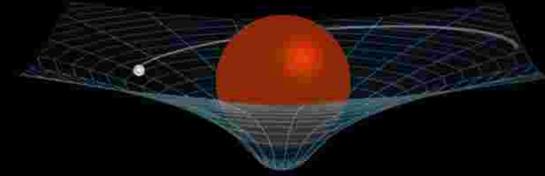
et d'après (1)

$$\frac{\partial \varphi'_{\mu}}{\partial x'_{\nu}} = \sum_{\beta} \frac{\partial x_{\beta}}{\partial x'_{\nu}} \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} \sum_{\alpha} \frac{\partial x_{\alpha}}{\partial x'_{\mu}} \varphi_{\alpha}$$

[p. 124] et en effectuant la dérivation

$$\frac{\partial \varphi'_{\mu}}{\partial x'_{\nu}} = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \frac{\partial x_{\alpha}}{\partial x'_{\mu}} \frac{\partial x_{\beta}}{\partial x'_{\nu}} \frac{\partial \varphi_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \frac{\partial x_{\beta}}{\partial x'_{\nu}} \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} \left( \frac{\partial x_{\alpha}}{\partial x'_{\mu}} \right) \cdot \varphi_{\alpha}$$

# la physique d'EINSTEIN au séminaire



**ne pas considérer la direction du haut comme remarquable!**

Prenant en compte les objets non terrestres, nous perdons la notion de repos absolu  
la formation de la TERRE et son évolution est un tout petit détail !

Prenant en compte les objets extraterrestres, nous perdons la notion de repos absolu  
la notion de ligne droite, de mouvement rectiligne n'ont pas de sens dans un champ  
de gravitation

les théories physiques connues ne peuvent avoir qu'un domaine de validité local

**l'espace physique ne contient aucun point particulier :**

ce qui implique des modèles d'espace sans point particulier  
les espaces mathématiques répondant à ce principe sont  
des espaces affines. Les espaces vectoriels des théories des  
mouvements ont un point singulier : le vecteur nul !

**l'indivisibilité de l'espace-temps**

dont l'unification est LA grande découverte d'Einstein  
une unique variété à 4 dimensions pour résoudre le problème de  
l'incompatibilité entre la position d'observateurs inertiels  
et la constance de la vitesse de la lumière ( cf Michelson )

# la physique



-----

notre environnement a des propriétés et une géométrie fonction de l'Univers

**un point de l'espace-temps s'appelle un événement**

et n'est plus un élément de position défini par un repère de référence

la séquence des évènements est représentée dans l'espace-temps par une courbe

**la ligne d'Univers**

**un événement existe par lui même**

sans qu'il soit besoin de le représenter par  $(t,p)$

**la géométrie de l'espace-temps n'est pas donnée à priori :**

**elle doit être découverte à partir d'observations physiques**

les évènements et les lignes d'Univers sont les éléments de base de cette géométrie

# la physique d'EINSTEIN de LEMAÎTRE

les règles de la géométrie euclidienne sont des axiomes  
celles de **la géométrie de l'espace-temps sont des constatations physiques**

( l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle )

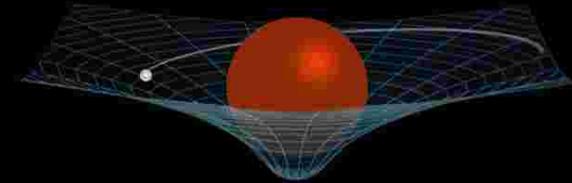
d'un côté un ensemble de courbes appelées lignes droites

de l'autre côté espace-temps un ensemble de lignes d'Univers correspondant  
aux particules massives en chute libre

l'élément le plus important de la géométrie de l'espace-tem

**la métrique de l'espace-temps**

$$ds^2 = g_{ab} dx^a dx^b$$



objet tensoriel déterminant la distance ou la durée de **2 évènements voisins**

l'existence et les propriétés d'une métrique proviennent du principe

de la relativité et du comportement de la lumière

**la métrique ( non quantique est donc un objet physique )**

**la métrique détermine le modèle d'espace par le tenseur de courbure**

exprimant toute l'information sur le champ gravitationnel

au voisinage de chaque événement ( traduit donc la courbure de l'espace-temps )

**le tenseur d'énergie-impulsion** décrit le contenu en masse-énergie  
d'un voisinage d'évènement

# la physique d'EINSTEIN

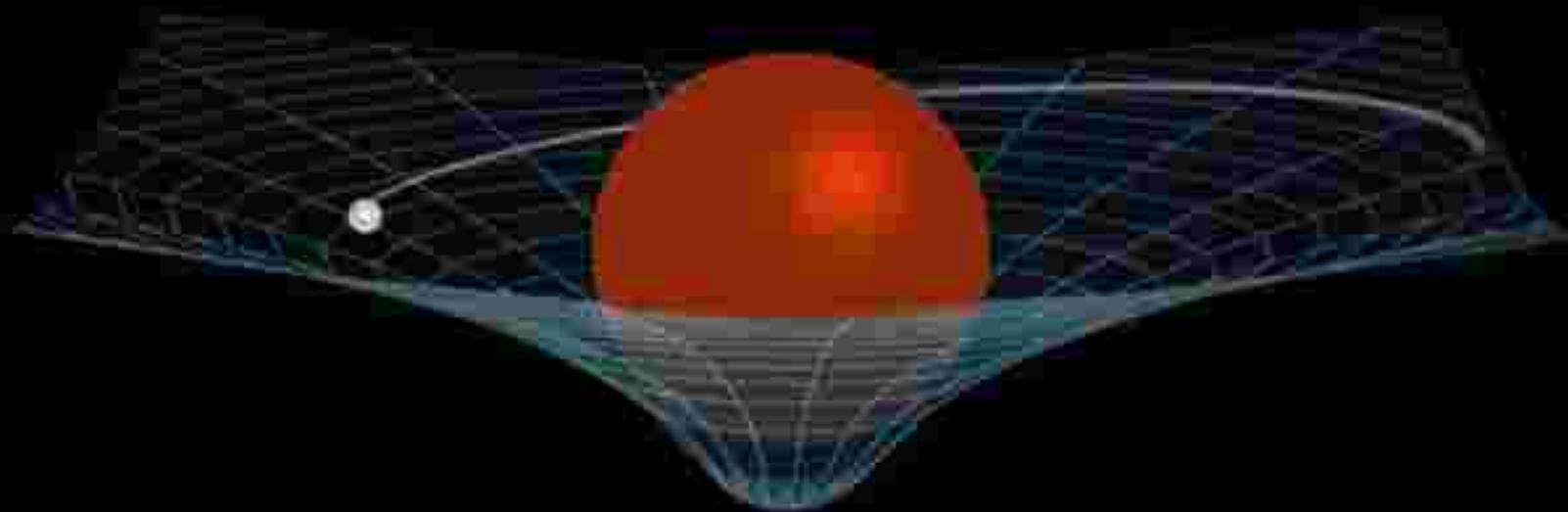
les 2 tenseurs sont reliés par :

$$G \quad T$$

géométrie = matière (masse)

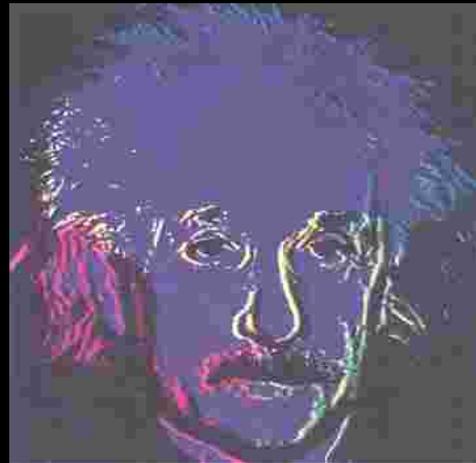

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

LEMAÎTRE n'invente rien, il rend la relativité compréhensible pour **lui même** dans une perspective électricité, géométrie des champs, distribution de potentiels



*G T*

Einstein pose l'équation,  
... mais ne donne pas de solutions



... et, selon Eddington, seules 3 personnes la comprend

# ambiguïtés des équations d'Einstein

$G$   $T$  dans  $T$  le théoricien met ce qu'il veut et l'astronome ce qu'il voit

système de 16 équations ramené par symétrie à 10 équations et 10 inconnues mais :

les inconnues sont elles mêmes des fonctions de 4 variables

homogénéité = uniquement diagonale

isotropie = repère indépendant

$g_{xx}$   $g_{xy}$   $g_{xz}$   $g_{xt}$

$$Einstein = \begin{pmatrix} \frac{e^{(2\Phi(r))} \left( 2 \left( \frac{\partial}{\partial r} \Lambda(r) \right) r + e^{(2\Lambda(r))} - 1 \right)}{r^2 e^{(2\Lambda(r))}}, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & -\frac{2 \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right) r - e^{(2\Lambda(r))} + 1}{r^2}, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -\frac{r \left( \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right) - \left( \frac{\partial}{\partial r} \Lambda(r) \right) + r \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} \Phi(r) \right) + r \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right)^2 - r \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right) \left( \frac{\partial}{\partial r} \Lambda(r) \right) \right)}{e^{(2\Lambda(r))}}, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & -\frac{\sin(\theta)^2 r \left( \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right) - \left( \frac{\partial}{\partial r} \Lambda(r) \right) + r \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} \Phi(r) \right) + r \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right)^2 - r \left( \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r) \right) \left( \frac{\partial}{\partial r} \Lambda(r) \right) \right)}{e^{(2\Lambda(r))}} \end{pmatrix}$$

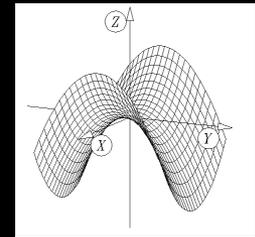
$$g := \text{table}([compts = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a(t)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(t)^2 \sin(\chi)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a(t)^2 \sin(\chi)^2 \sin(\theta)^2 \end{pmatrix}, \text{index\_char} = [-1, -1]])$$

$$metric := d(s)^2 = \left( -c^2 + \frac{2c^2 \alpha}{r} \right) d(t)^2 + \left( 1 + \frac{2\alpha}{r} \right) d(r)^2 + r^2 (d(\theta))^2 + \sin(\theta)^2 d(\phi)^2$$

# la physique d'EINSTEIN du séminaire à Cambridge

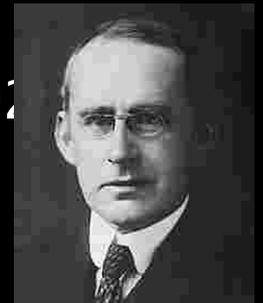
sur les conseils du professeur De Muyck, lui même séminariste,  
et grâce à son mémoire « la physique d'Einstein »  
Lemaître gagne le concours des bourses de voyage  
( Ministère Belge des Arts et des Sciences )  
obtient le fellowship de la Commission for the Relief in Belgium  
American Education Foudation

( il demande d'aller étudier les quaternions auprès d'Eddington  
(spécialiste aussi des quaternions)  
et de parfaire son anglais, en fait il veut côtoyer celui  
qui a trouvé la preuve de la RG )  
Il est ordonné prêtre le 22 septembre 1923



Il est étudiant-chercheur  
auprès d'Eddington à Cambridge en octobre 1923

une aventure scientifique exceptionnelle  
va commencer !

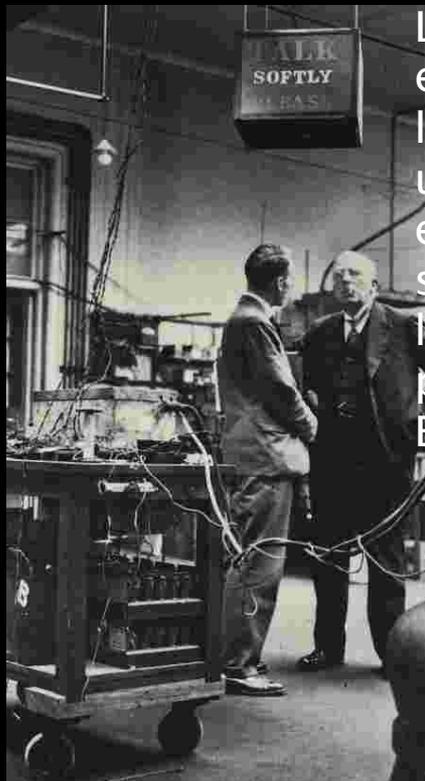


# LEMAÎTRE à Cambridge



suit les cours d'**astronomie** avec Eddington  
de **physique des particules** avec Rutherford  
de **calcul numérique** avec Hobson  
recherches sur le rayonnement des céphéides avec Eddington

**techniques de résolution numérique des équations différentielles**  
( sujet favori de Lemaître )

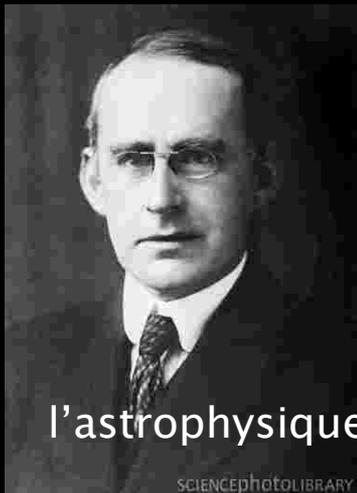


Lemaître modifie son texte de 1922 sur les **événements simultanés** en RR

les événements simultanés sont définis par rapport à un système d'axes en mouvements rectilignes uniformes en RG dans l'espace-temps 2 événements infiniment voisins sont simultanés si le segment qui les joint est orthogonal à leur ligne d'Univers. Par intégration, il trouve une courbe dont tous les points sont simultanés aux 2 premiers.

Eddington communiquera ces résultats à Edimbourg en 1927

**après d'Eddington, Lemaître découvre  
la liaison relativité générale – astrophysique  
devant son intérêt pour les céphéides et les champs gravitationels  
Eddington lui suggère un complément d'études auprès  
de Shapley à HARVARD et le recommande à celui ci**

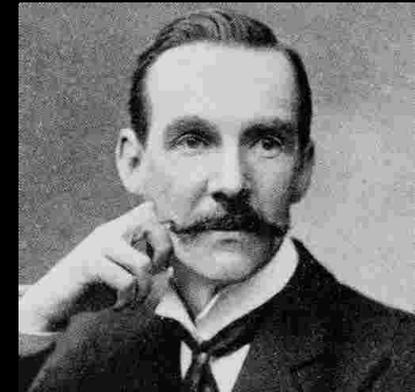


l'astrophysique

SCIENCEPHOTOLIBRARY



la physique



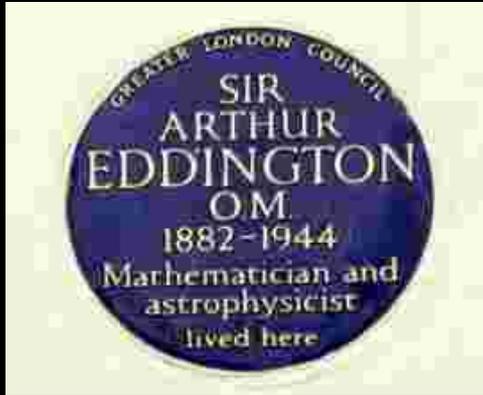
l'analyse numérique

à C  
a  
m  
b  
r  
i  
d  
g  
e  
i  
l  
e  
s  
t  
l  
o  
g  
é  
à  
S  
t  
E  
d  
m  
u  
s

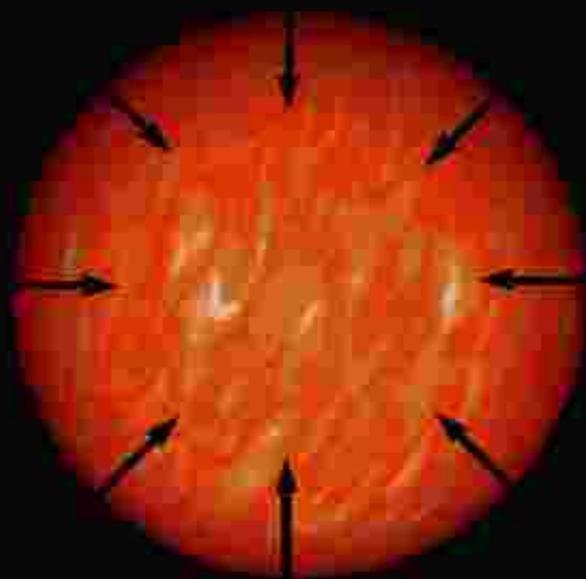
bureau de Lemaître à Cambridge



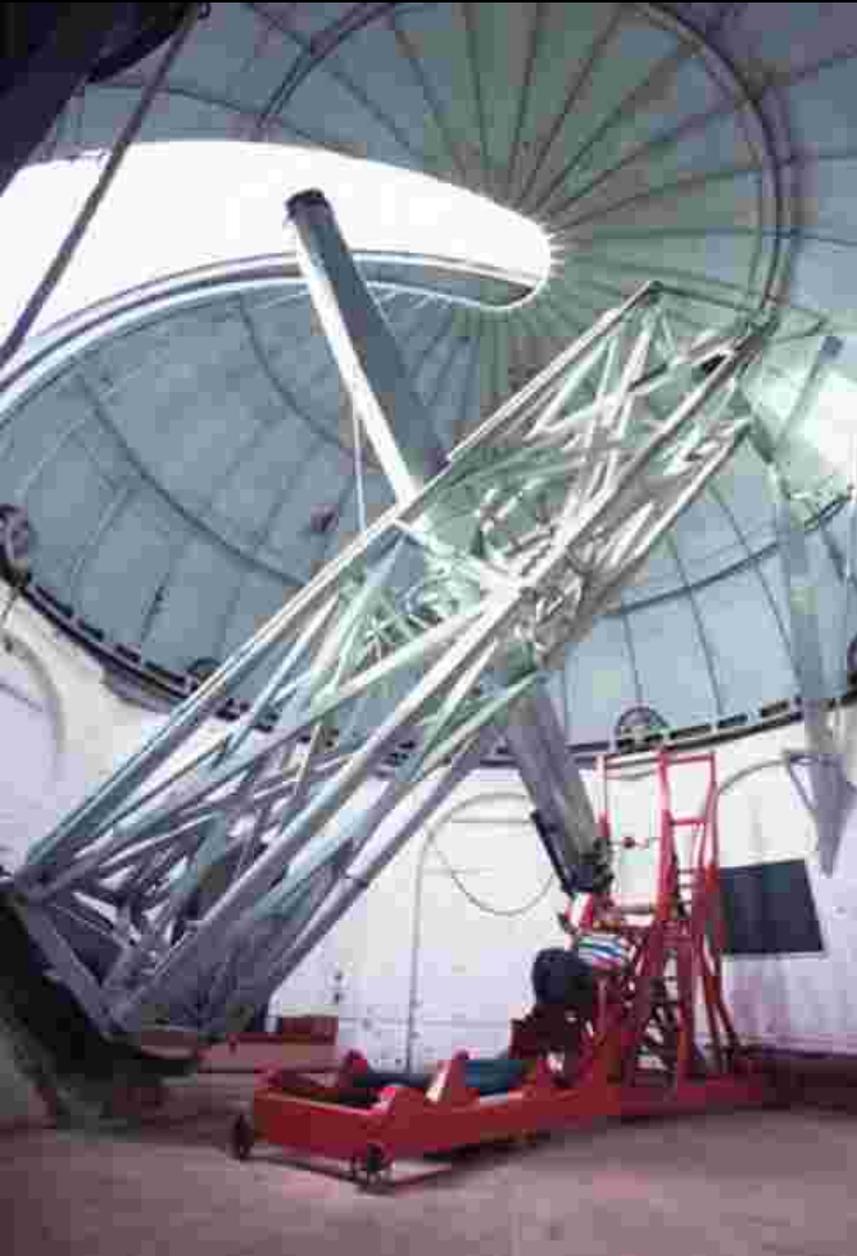
Président : Société Astronomique Royale ( 1921–1923 )  
Société de Physique ( 1930–1932 )  
Mathematical Association ( 1932–1938 )  
Union Astronomique Internationale



- 1913 Plumian Chair of Astronomy  
1914 directeur du Cambridge Observatory  
membre de la Royal Society  
1916 applique la mécanique statistique aux systèmes d'étoiles par assimilation aux molécules d'un gaz, **calcul de la masse des amas** par le théorème du viriel ( repris par Zwicky ) avec De Sitter saisi **l'importance de la Relativité**  
1919 preuve par l'éclipse de Sobral  
1923 The Mathematical Theory of Relativity  
**constitution interne des étoiles** par l'étude des **céphéïdes ( participation Lemaître )**  
état d'équilibre **pression-gravitation**  
l'exemple du compagnon de Sirius la première naine blanche. Il s'agit d'un astre de la masse du Soleil , mais du diamètre de la Terre . Ce qui signifie une masse par une unité de volume 60 000 fois supérieure à celle de l'eau. Eddington interprète cette densité colossale par un affaiblissement de la pression thermique dû au refroidissement de l'étoile  
querelle avec Chandrasekhar sur effondrement  
1924 relation **masse-luminosité**  
conséquences cosmologique de la Relativité  
1927 accepte comme modèle d'Univers celui de Lemaître



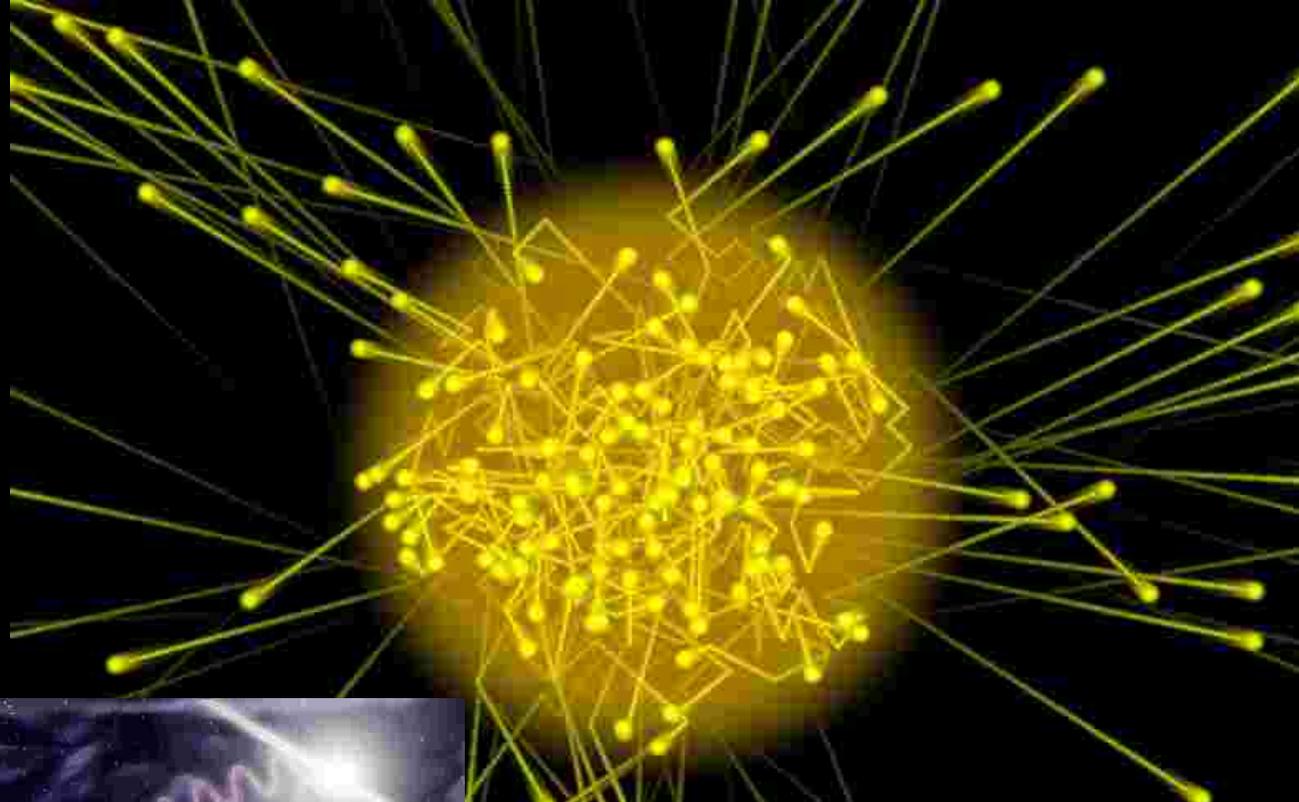
## constitution interne des étoiles par l'étude des céphéides



### état d'équilibre pression- gravitation

Eddington, avec Lemaître, prend exemple du compagnon de Sirius la première naine blanche étoile de la masse du Soleil mais du diamètre de la Terre  
Cela signifie une masse par une unité de volume 60 000 fois supérieure à celle de l'eau.

Eddington interprète cette densité colossale par un affaiblissement de la pression thermique dû au refroidissement de l'étoile



après d'Eddington, Lemaître découvre  
**la liaison relativité générale –  
astrophysique**

devant son intérêt pour les céphéïdes et les  
champs gravitationnels

Eddington lui suggère un complément  
d'études auprès  
de Shapley à HARVARD et le recommande à  
celui ci



## LEMAÎTRE à Cambridge

lettre d'appréciation d'Eddington à De Donder fin 1924

*« I found M.Le Maître a very brilliant student, wonderfully quick and clear-sighted, and of great mathematical ability. He did some excellent work whilst here, which I hope he will publish soon. I hope he will do well with Shapley at Harvard. In case his name is considered for any post in Belgium I would be able to give him my strongest recommendation. »*

# LEMAÎTRE au Canada

Lemaître rentre en Belgique et repart aussitôt à Toronto accompagner Eddington au « Meeting of the British Association for the Advancement of the Sciences »

conférence d'Eddington sur  
la Relativité Générale et

le rayonnement dégagé par une étoile



rencontre Lemaître Ludwick Silberstein  
sur la détermination

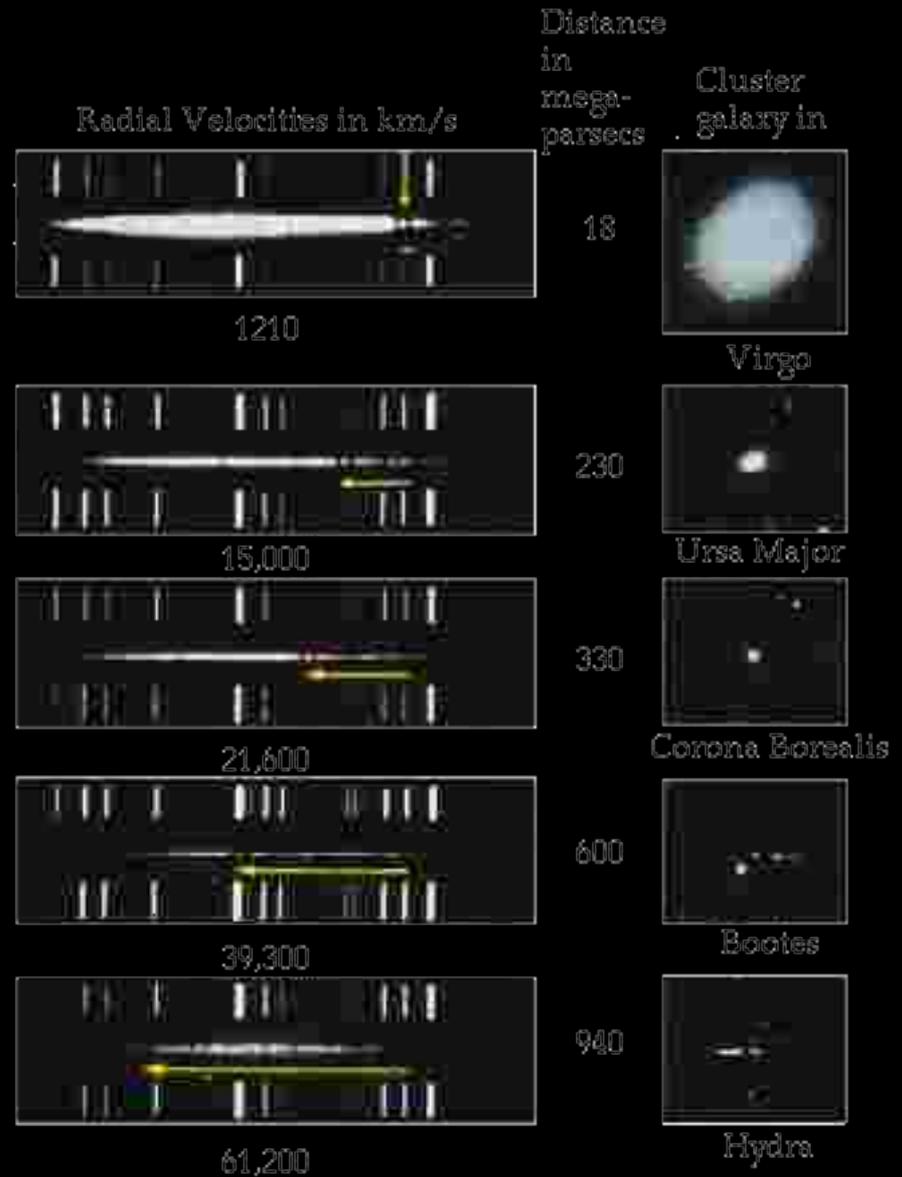
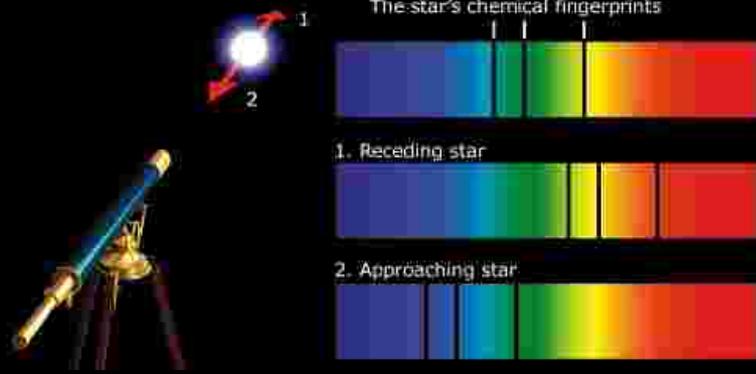
du rayon de courbure de l'espace-temps ( modèle de Sitter donc vide de matière que LS interprète comme étant en expansion! ). Si on y introduit un observateur et des étoiles sous forme de particules libres en mouvement radial inertiel alors la lumière provenant de ces étoiles subit un décalage de longueur d'onde vers le rouge ou le bleu proportionnel à la distance et inversement proportionnel au rayon de l'Univers Silberstein vérifie sur la distances de 8 amas globulaires et sur les nuages de Magellan, ... mais truque ses calculs!

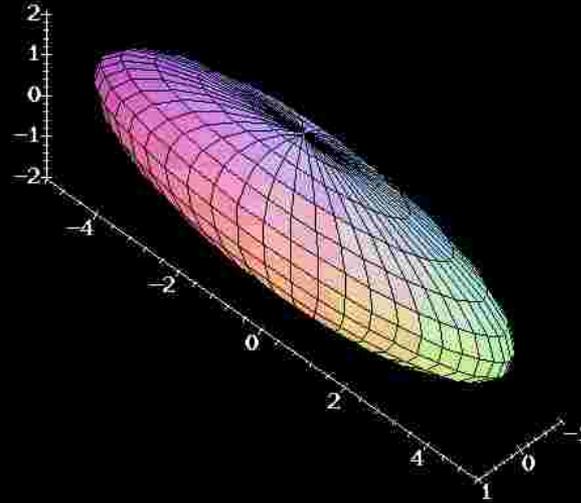
résultat :

GL étudie l'Univers de de Sitter selon le décalage spectral

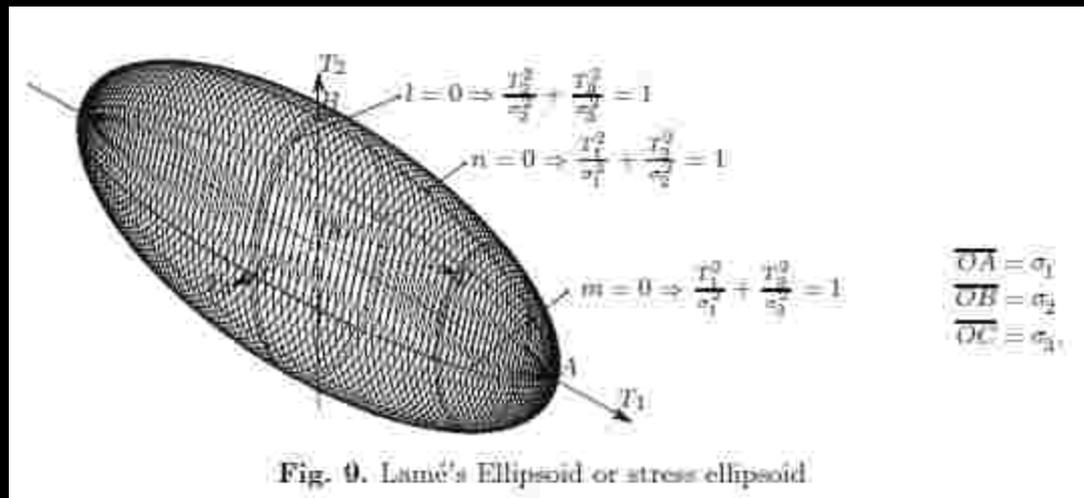


# Lemaître introduit le redshift dans les interprétations





GL assiste aussi « International Mathematical Congress «avec de la Vallée Poussin et Elie Cartan» stabilité des ellipsoïdes en fluides homogènes «



## The Curtis-Shapley Debate



Shapley



Curtis

- what is the size of our galaxy?
- what is the nature of spiral nebula?

1921

4

## NRC Transcripts of the `Great Debate'

[What follows is a hypertext transcription of the published version of the `Great Debate' Coun., 2, 171]

### BULLETIN OF THE

## NATIONAL RESEARCH COUNCIL

Vol. 2, Part 3, May, 1921, Number 11, pp 171-217.

### THE SCALE OF THE UNIVERSE [\*]

PART I: BY HARLOW SHAPLEY

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington

PART II: BY HEBER D. CURTIS

Director, Allegheny Observatory

#### CONTENTS

##### Part I

Evolution of the idea of galactic size

Surveying the solar neighborhood

On the distances of globular clusters

The dimensions and arrangement of the galactic system

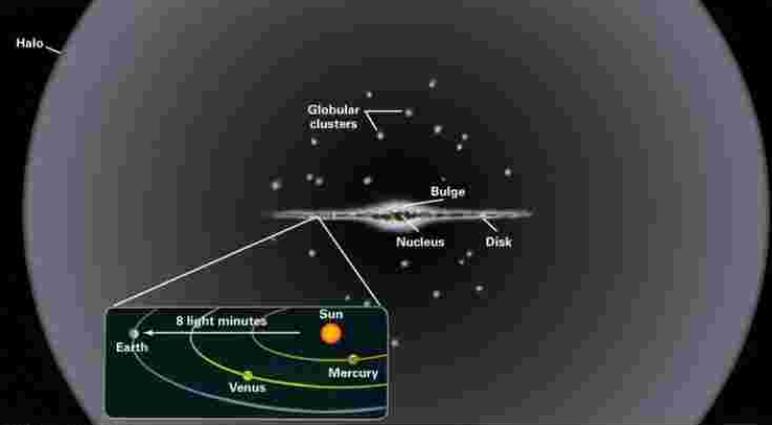
##### Part II

Dimensions and structure of the galaxy

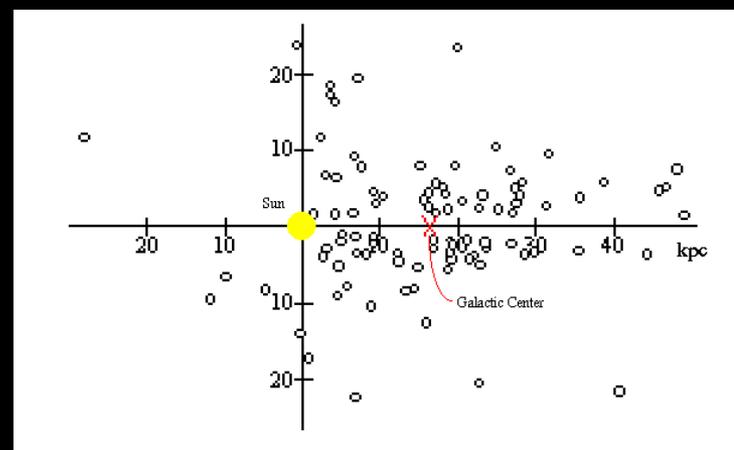
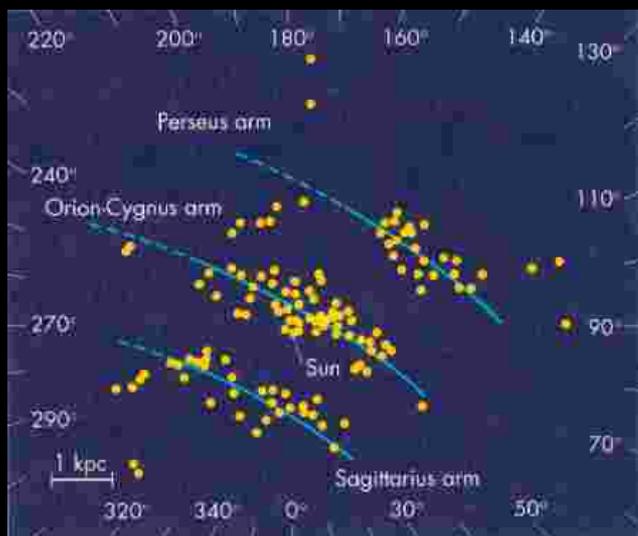
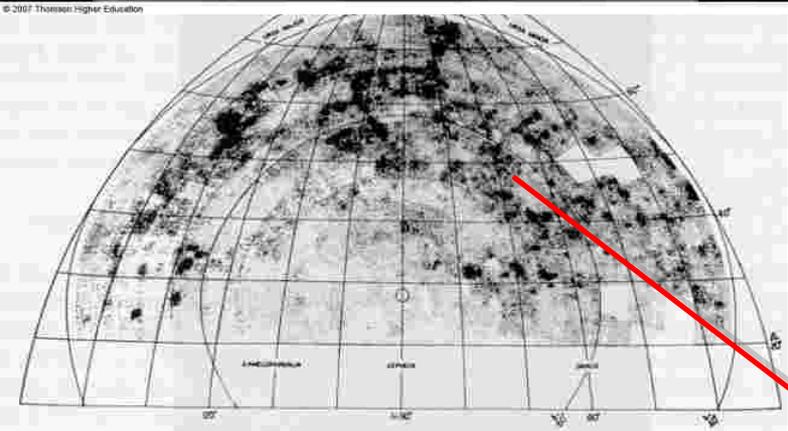
Evidence furnished by the magnitude of stars

The spirals as external galaxies





## 1920: Harlow Shapley Finds Our Place in the Milky Way



# LEMAÎTRE à Harvard

Shapley utilise le graphique de Leavitt pour calculer la distance de 100 amas globulaires et trouve au Mont Wilson 1300 céphéïdes dans 62 amas. Avec Hertzsprung il généralise la loi graphique de Leavitt



**LEMAÎTRE** va de Toronto au Dominion Observatory d'Ottawa voir Henroteau, astronome belge, LE spécialiste des céphéïdes  
septembre 1924 nouvelle bourse CRB Graduate Fellow **avec Shapley recommandé par Eddington**  
Il s'inscrit au Massachusetts Institute of Technology pour un nouveau doctorat

GL suit des **cours de spectroscopie expérimentale**  
rencontre avec de la Vallée Poussin ( intégrales de Stieltjes, équation intégrale de Volterra )  
**membre du Harvard Mathematical Club et de Association of Variable Stars Observers**

Au MIT directeur de thèse nominal : Heymans

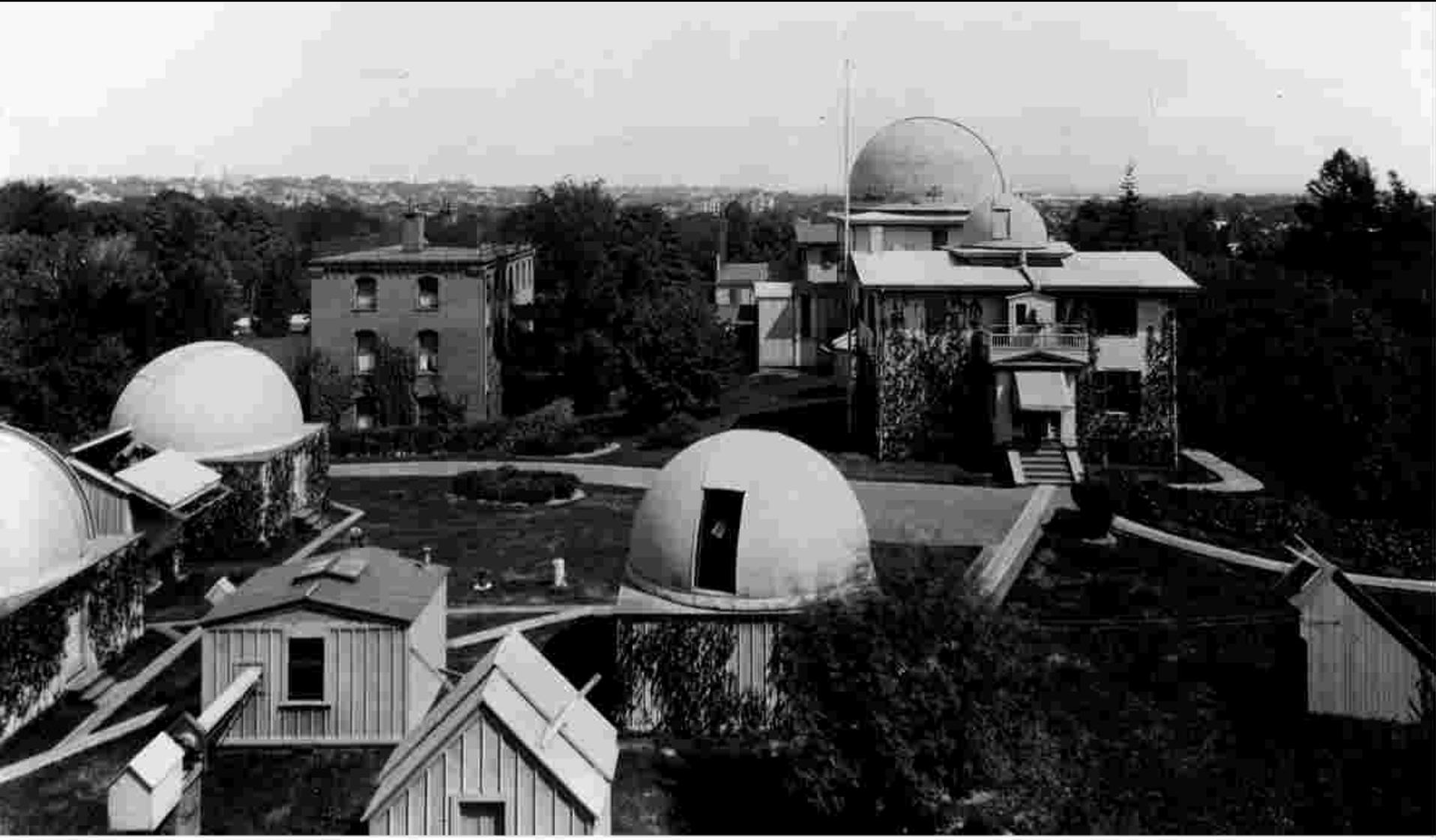
3 sujets d'études :

Relativité Générale

céphéïdes

**théorie unitaire d'Eddington sur l'électromagnétisme et la gravitation ( en 1924 ! )**

# l'Observatoire d'Harvard



# The Woman Who Discovered the Key to Measuring the Universe

Henrietta Leavitt



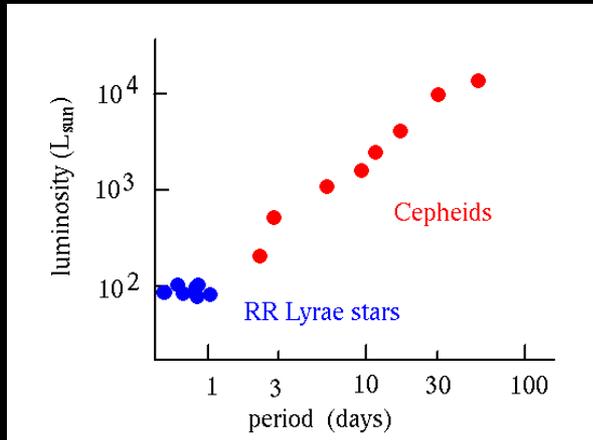
Scanned at the American  
Institute of Physics

Hubble recommended that Leavitt be awarded the Nobel Prize in Physics and the head of the Swedish Academy of Sciences began the paperwork for her nomination. That came to a halt, however, when they realized that she had died of cancer in 1921.

# Cepheid Variable Star V1 in M31

Hubble Space Telescope • WFC3/UVIS





# LEMAÎTRE au MIT

## ASTRONOMIE

au labo de Shapley G Lemaître met au point une méthode graphique de calcul de période d'oscillation d'étoiles pulsantes d'une magnitude et d'un type spectral donnés partant de la méthode de vérification d'Eddington de la relation masse-luminosité. Il montre aussi que la théorie des étoiles pulsantes s'applique aussi à d'autres étoiles de type spectral O et M.

G Lemaître étudie aussi les étoiles à doubles éclipses de type Lyra. Shapley publie ces résultats.



Scanned at the American Institute of Physics

# COSMOLOGIE

G Lemaître étudie l'Univers de de Sitter ( Cf Toronto )

3 solutions aux équations d'Einstein

Univers vide de matière et sans courbure

( espace-temps de Minkowski, relativité restreinte )

Univers d'Einstein espace-temps avec espace sphérique

fini sans frontière rempli de fluide parfait de densité  
constante et de pression nulle

Univers de de Sitter espace vide de matière

G Lemaître démontre que la métrique de de Sitter modifiée  
Eddington

est incorrecte car implique un centre.

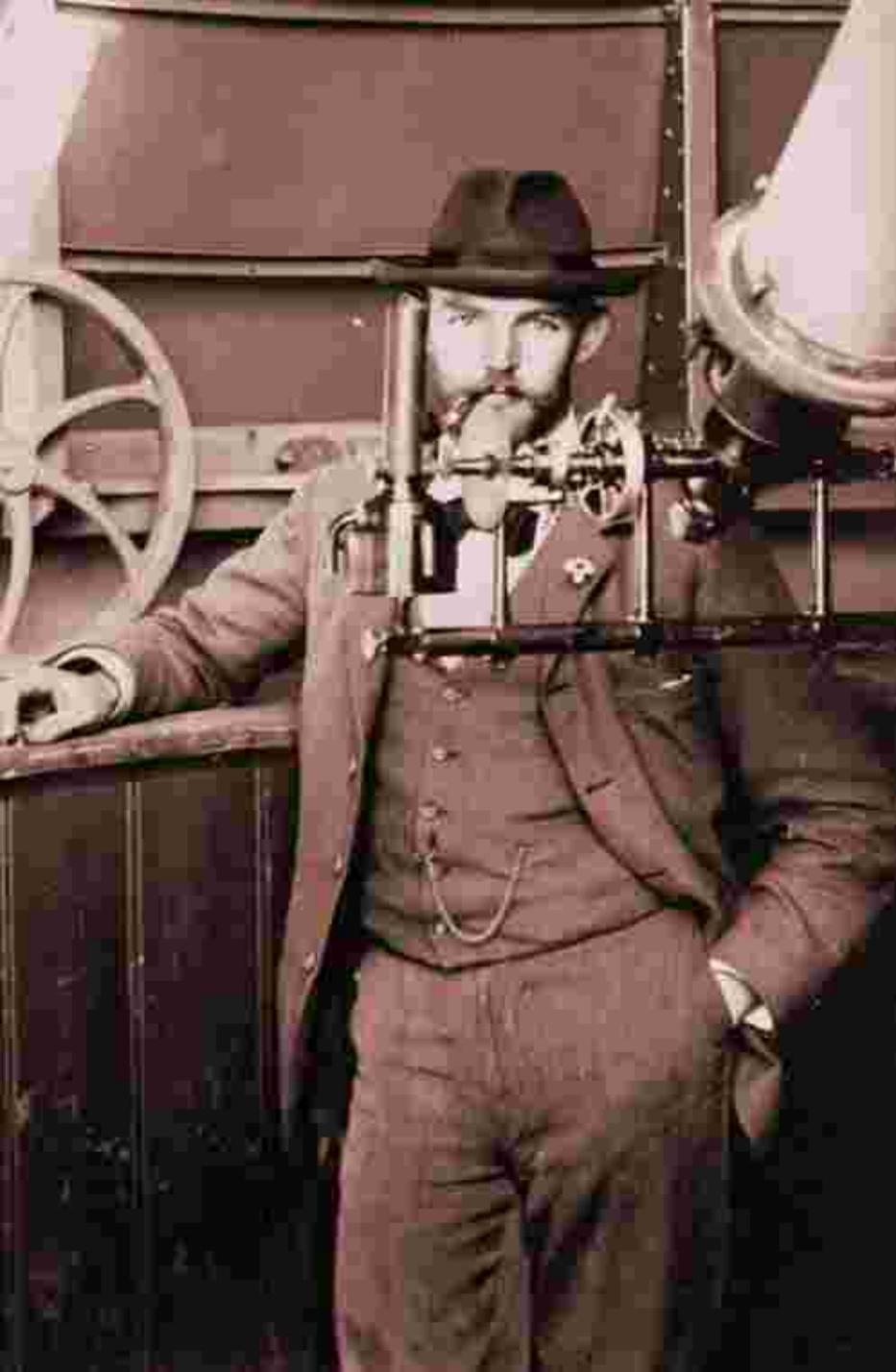
Il utilise la métrique de

Lanczos et un changement de coordonnées redécouvert par

Robertson. Il démontre que l'Univers de de Sitter est un

espace euclidien donc sans courbure et sans centre se dilatant

exponentiellement au cours du temps ( Cf Bondi-Hoyle-Gold III )



l'entremetteur  
**Willem de Sitter**  
va jouer un grand rôle :

Il parle le premier de **modèle d'Univers**  
en y appliquant la Relativité  
il met en **contact Eddington et Einstein**  
Lemaître va étudier à fond son modèle  
puis de Sitter va aider à la propagation  
des résultats de Lemaître auprès  
d'Einstein et Eddington  
et de toute la communauté scientifique

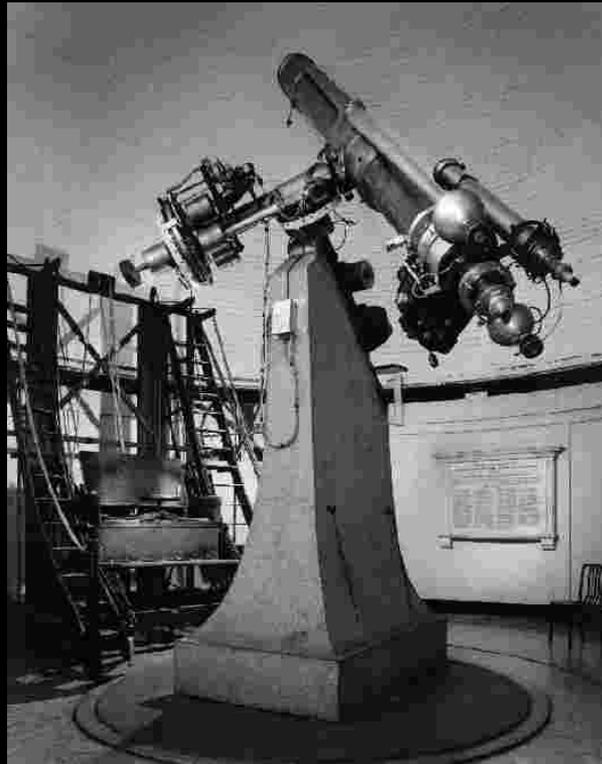
# LEMAÎTRE au MIT

Lemaître considère que le modèle de de Sitter ne répond pas aux observations.

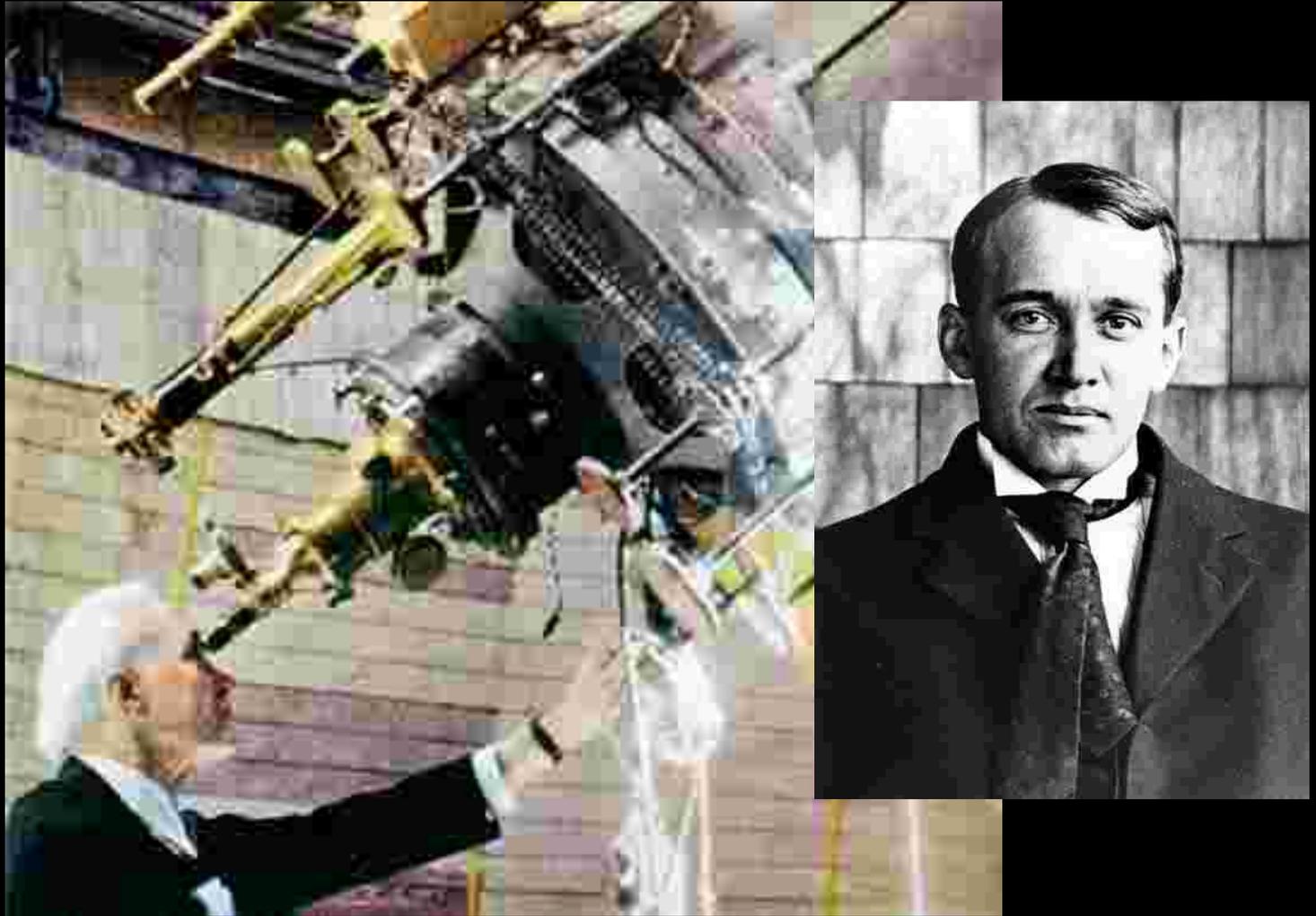
**il adoptera toujours un modèle d'Univers fini**

Il rédige sa thèse :

« The gravitational Field in a Fluid Sphere of  
Uniform Invariant Density according to the Theory of Relativity »



# l'observation prime sur la théorie



découverte de la relation décalage spectral-vitesse d'éloignement

( et non pas Hubble ) en août 1914 et 1921 ( 41 nébuleuses ) 17 jours de pose !

mesure des vitesses radiales par Vesto Slipher au Lowell Observatory Arizona

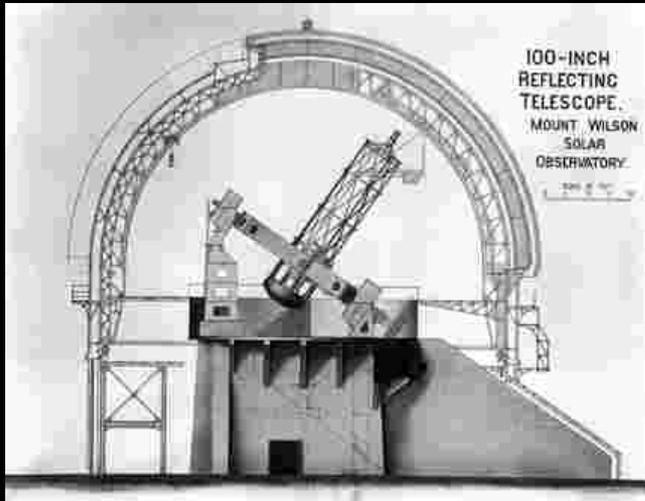
Lemaître est toujours là au bon moment avec la bonne personne

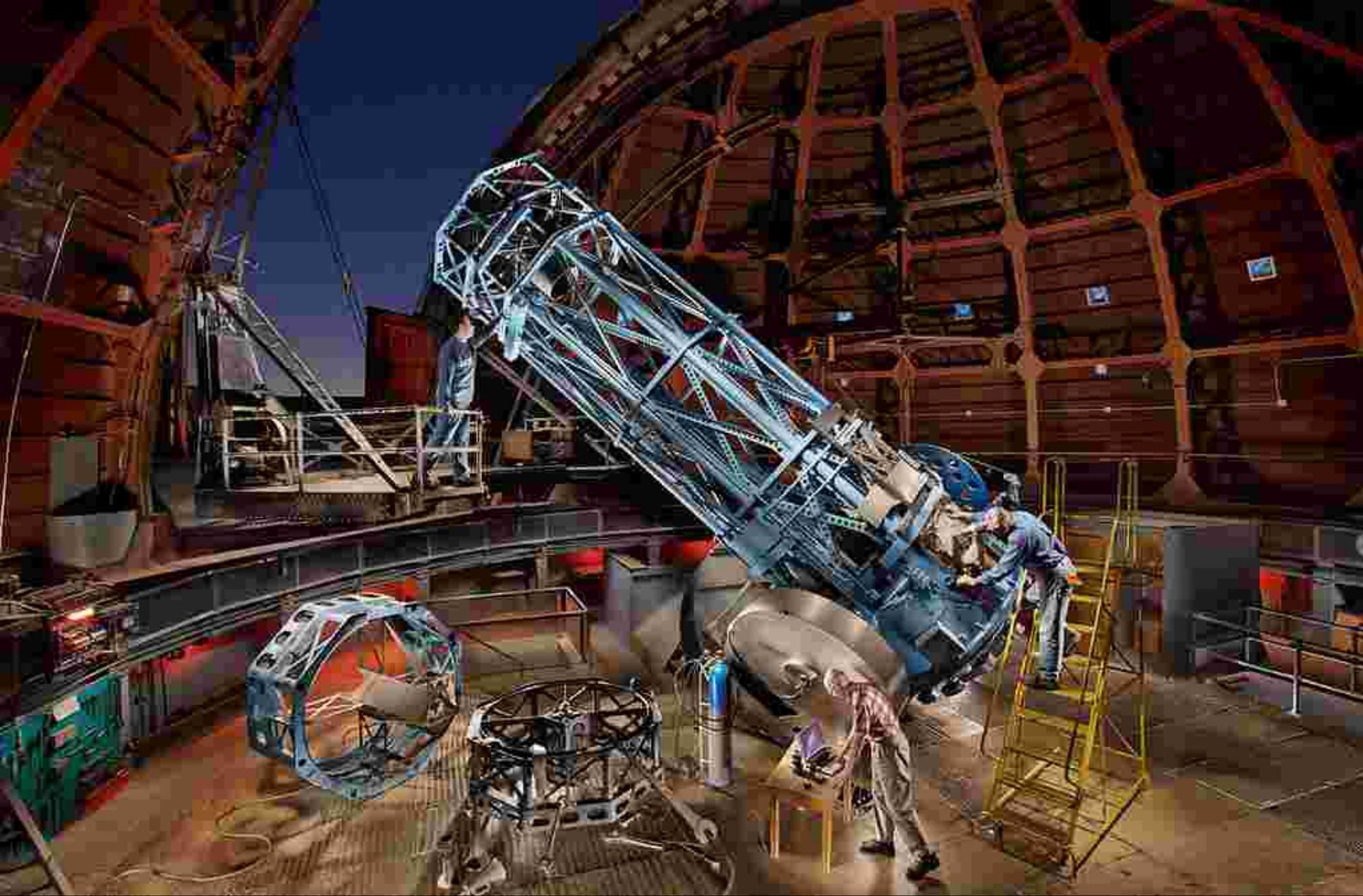


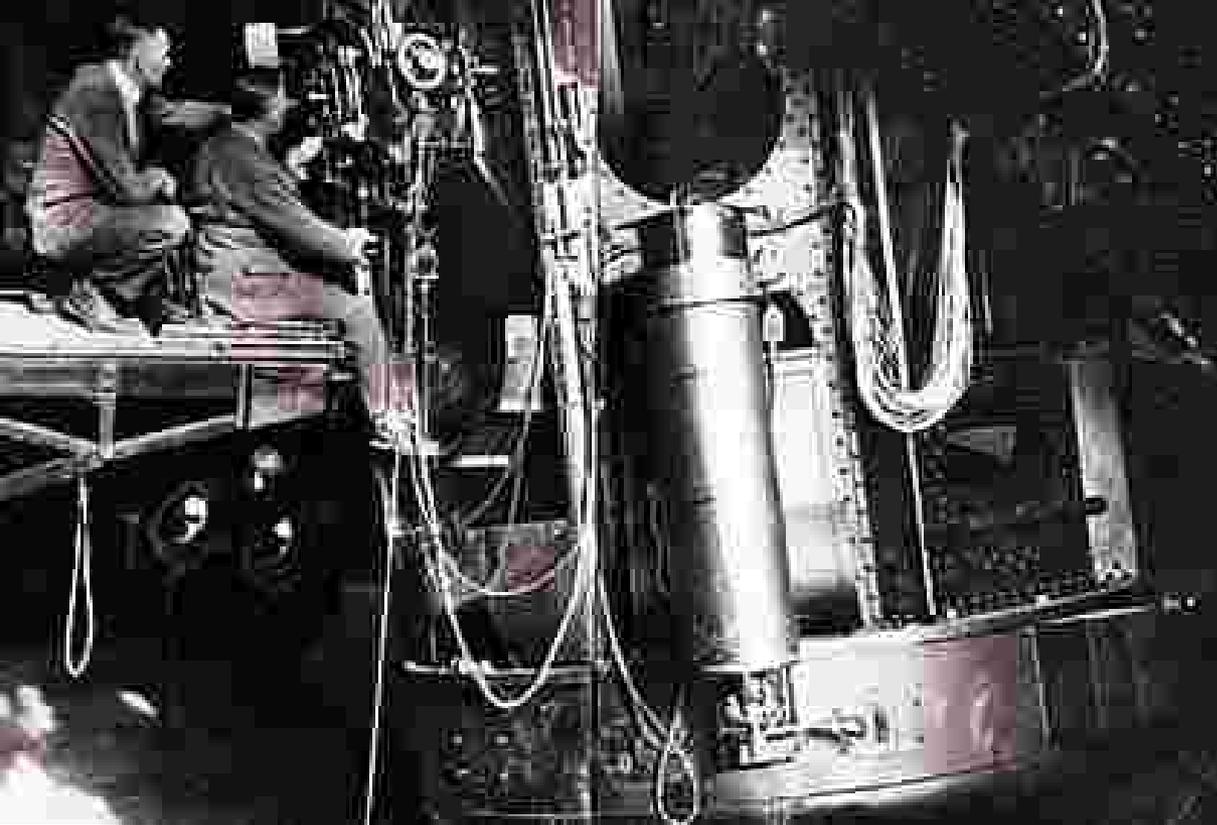
Scanned at the American  
Institute of Physics

Robert Millikan (1868, 1953) utilise à l'American National Academy of Sciences pour la première fois le 9 novembre 1925 le terme « rayons cosmiques » et en informe Lemaître qui en fera « les rayonnements fossiles de la naissance des monde »

# l'observatoire du Mont Wilson







Humason

Hubble et Humason au primaire  
du 100 inches Hooker



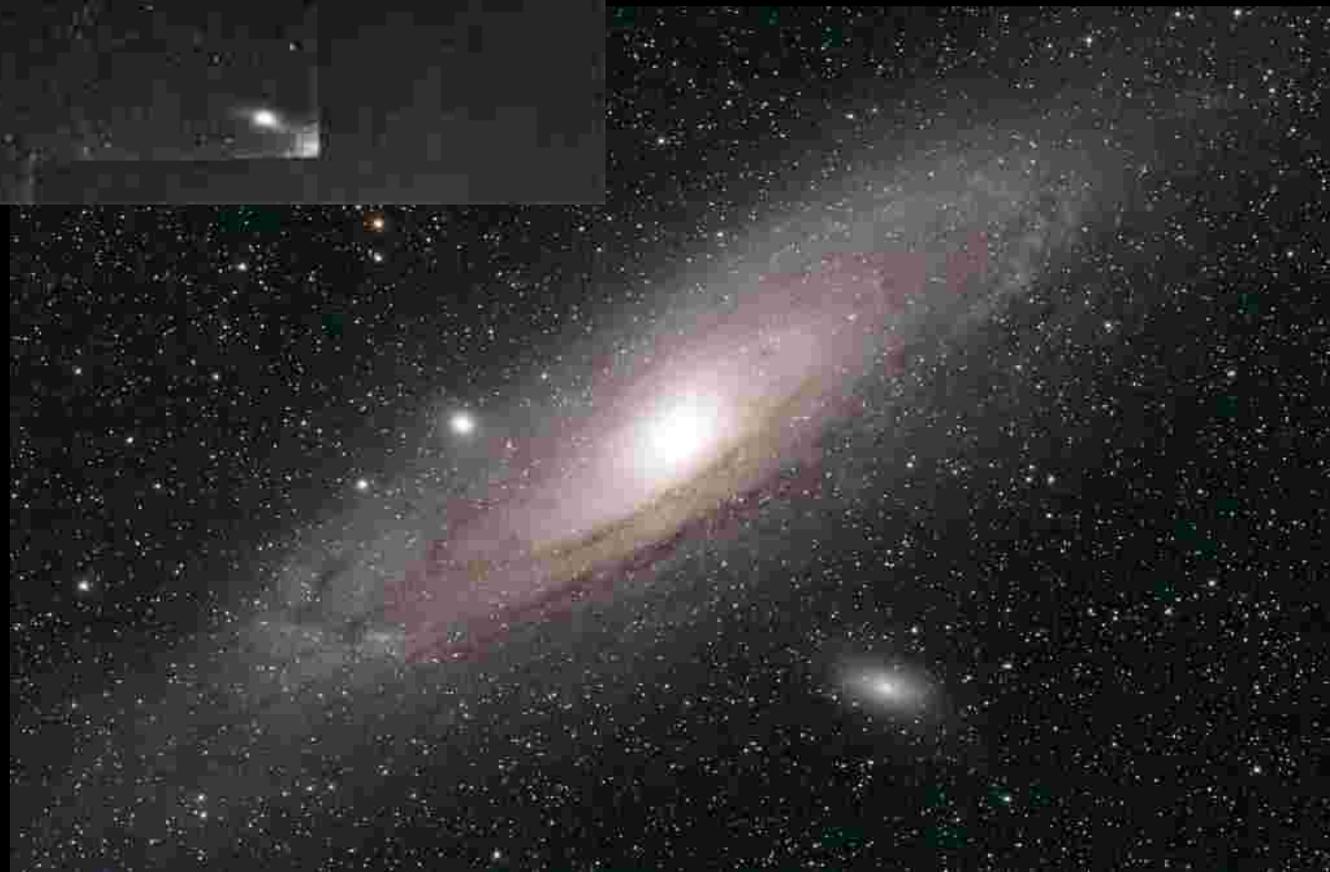


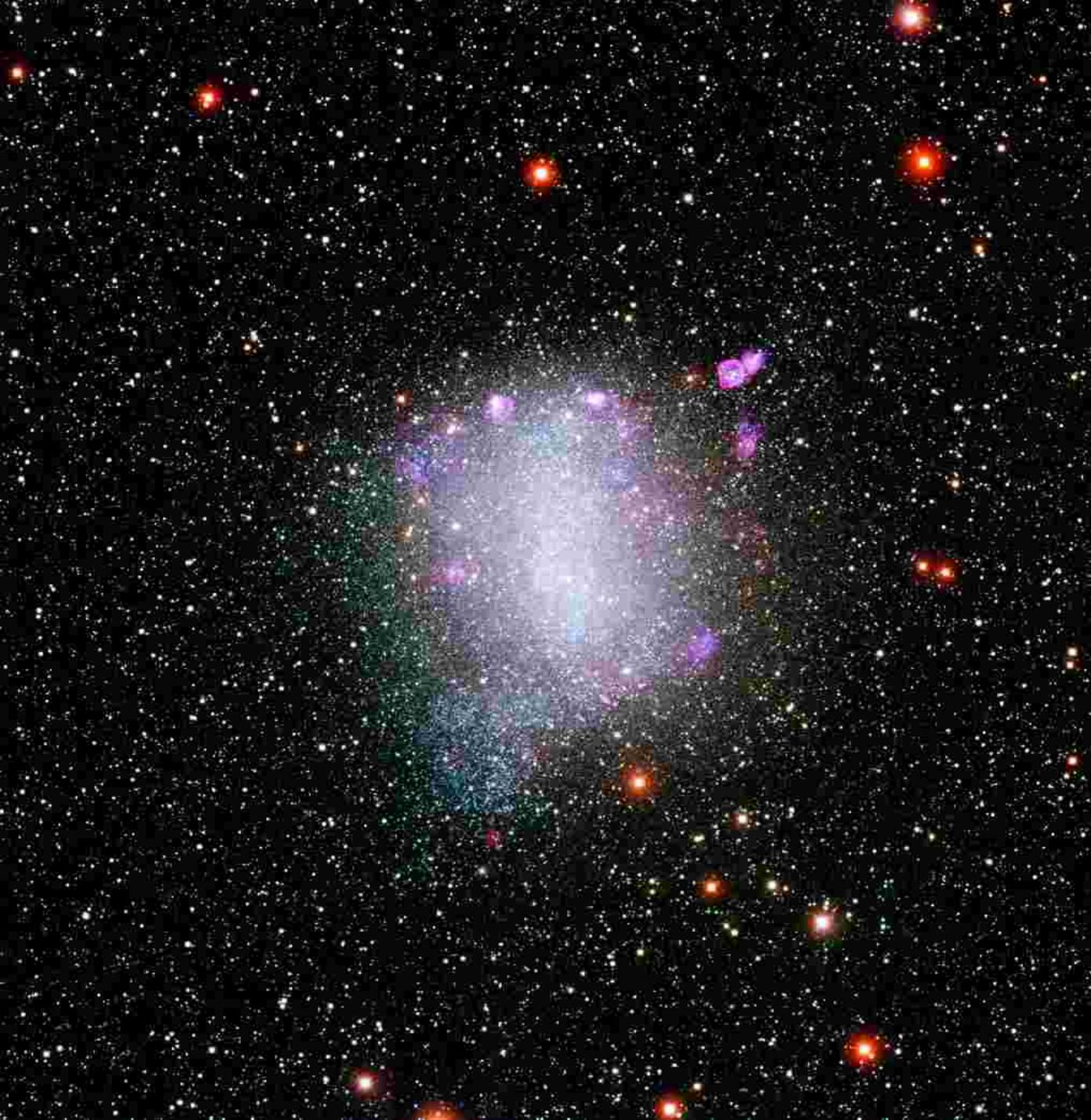
M31 plaque d'Hubble Humason expositon : 9 h 1923



1924  
2004

à 80 ans d'intervalle  
M31  
en pro  
et en amateur





premières mesures  
de céphéides

NGC 6822  
premier objet d'une  
région  
extragalactique

NGC 6822  
galaxie naine  
irrégulière  
1.8 Mal Sg  
groupe local

a Remote Stellar  
System  
1925  
Astrophysical  
Journal

puis M 33



M33

# cahier de coupole de Hubble

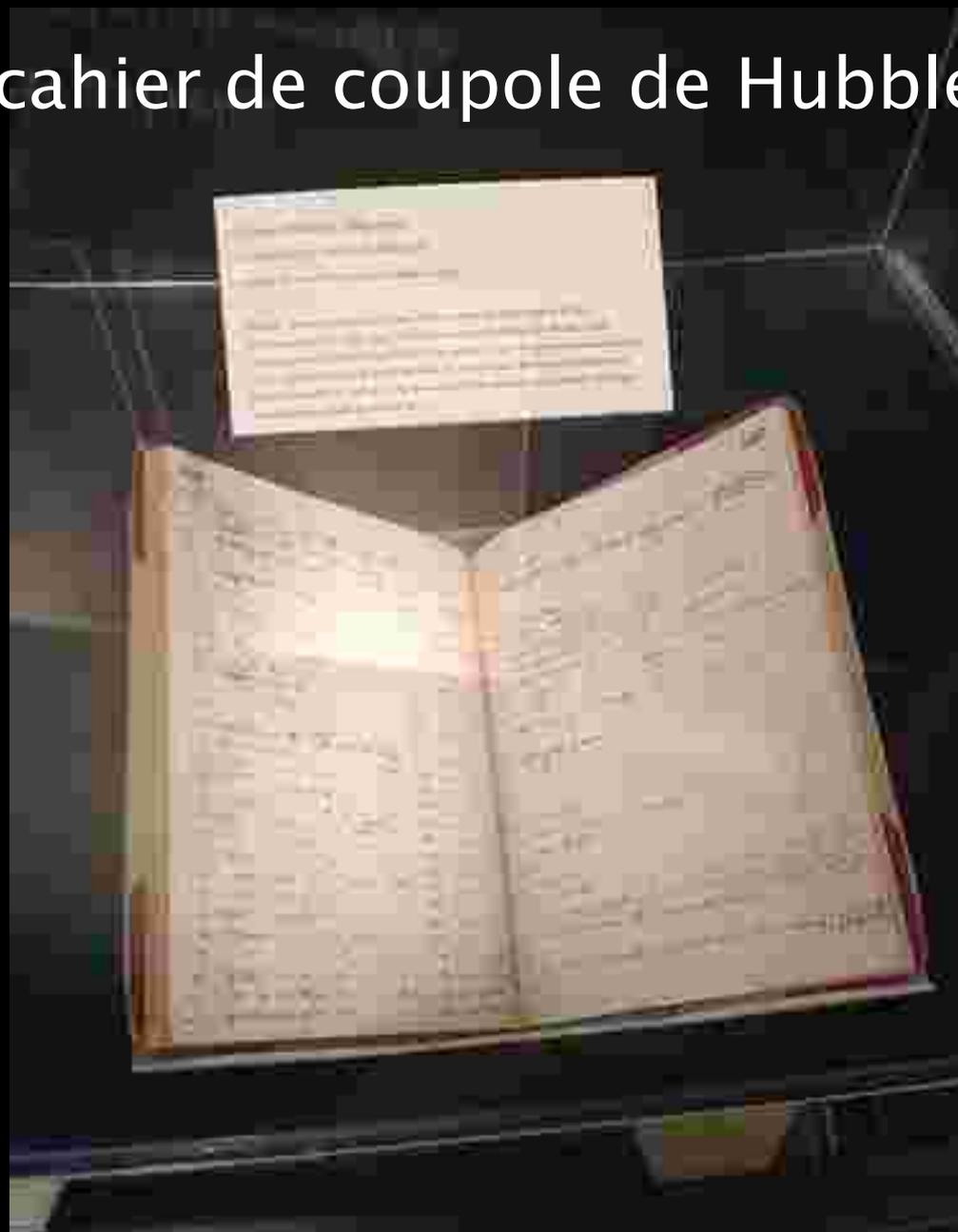


Plate	Star	RA	Dec	Mag	Dist	Mag	Dist	Mag	Dist	Notes
217	...	...	...	...	...	...	...	...	...	fairly good
218	...	...	...	...	...	...	...	...	...	from tonight
219	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
220	...	...	...	...	...	...	...	...	...	fairly large
221	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
222	...	...	...	...	...	...	...	...	...	fairly good
223	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
224	...	...	...	...	...	...	...	...	...	fairly good
225	...	...	...	...	...	...	...	...	...	very only
226	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
227	...	...	...	...	...	...	...	...	...	very
228	...	...	...	...	...	...	...	...	...	very
229	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
230	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
231	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
232	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
233	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
234	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
235	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
236	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
237	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
238	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
239	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
240	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
241	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
242	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
243	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
244	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
245	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
246	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
247	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
248	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
249	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good
250	...	...	...	...	...	...	...	...	...	good

Remarks

251 slightly spotted ...

252 ...

253 ...

254 ...

255 ...

256 ...

257 ...

258 ...

259 ...

260 ...

261 ...

262 ...

263 ...

264 ...

265 ...

266 ...

267 ...

268 ...

269 ...

270 ...

271 ...

272 ...

273 ...

274 ...

275 ...

276 ...

277 ...

278 ...

279 ...

280 ...

281 ...

282 ...

283 ...

284 ...

285 ...

286 ...

287 ...

288 ...

289 ...

290 ...

291 ...

292 ...

293 ...

294 ...

295 ...

296 ...

297 ...

298 ...

299 ...

300 ...

301 ...

302 ...

303 ...

304 ...

305 ...

306 ...

307 ...

308 ...

309 ...

310 ...

311 ...

312 ...

313 ...

314 ...

315 ...

316 ...

317 ...

318 ...

319 ...

320 ...

321 ...

322 ...

323 ...

324 ...

325 ...

326 ...

327 ...

328 ...

329 ...

330 ...

331 ...

332 ...

333 ...

334 ...

335 ...

336 ...

337 ...

338 ...

339 ...

340 ...

341 ...

342 ...

343 ...

344 ...

345 ...

346 ...

347 ...

348 ...

349 ...

350 ...

351 ...

352 ...

353 ...

354 ...

355 ...

356 ...

357 ...

358 ...

359 ...

360 ...

361 ...

362 ...

363 ...

364 ...

365 ...

366 ...

367 ...

368 ...

369 ...

370 ...

371 ...

372 ...

373 ...

374 ...

375 ...

376 ...

377 ...

378 ...

379 ...

380 ...

381 ...

382 ...

383 ...

384 ...

385 ...

386 ...

387 ...

388 ...

389 ...

390 ...

391 ...

392 ...

393 ...

394 ...

395 ...

396 ...

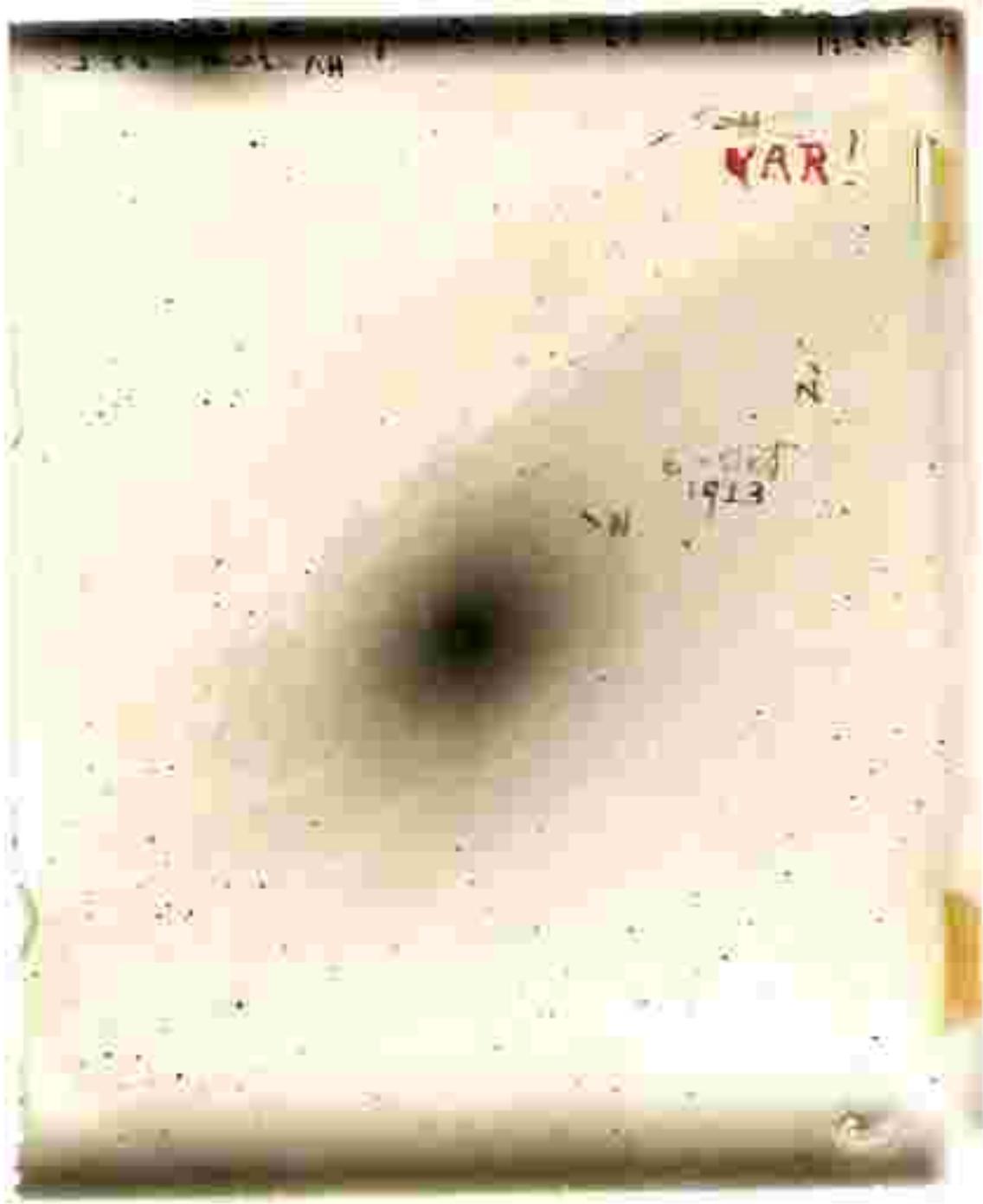
397 ...

398 ...

399 ...

400 ...

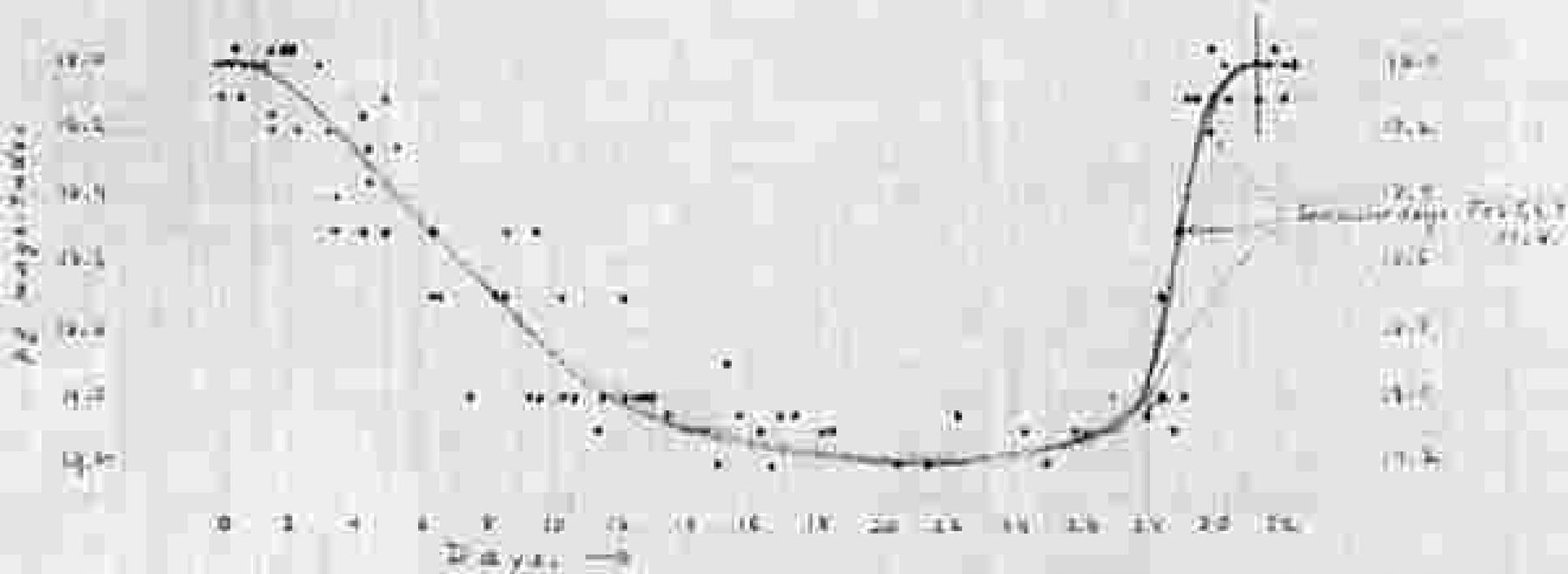
cahier d'observation d'Hubble céphéide plaque 331  
 nova suspected plaque 335 confirm nova ( in fact  
 cepheid )



la plaque 335  
6 octobre 1923

N les novae d'Andromède

Variable  $M=1$  in Messier 31;  
 (See from median = 4.44 days,  $M=1.75$  Smith)



Period 30.514 days  
 Epoch 30.232 days  
 Range 12.02 mag  
 Median 11.62 mag

3. When the range and median magnitude are referred to 12.0 and 11.6 respectively, a reasonable cold index is  $+0.9$ . Then,

$M = -2.5$  (from the period)

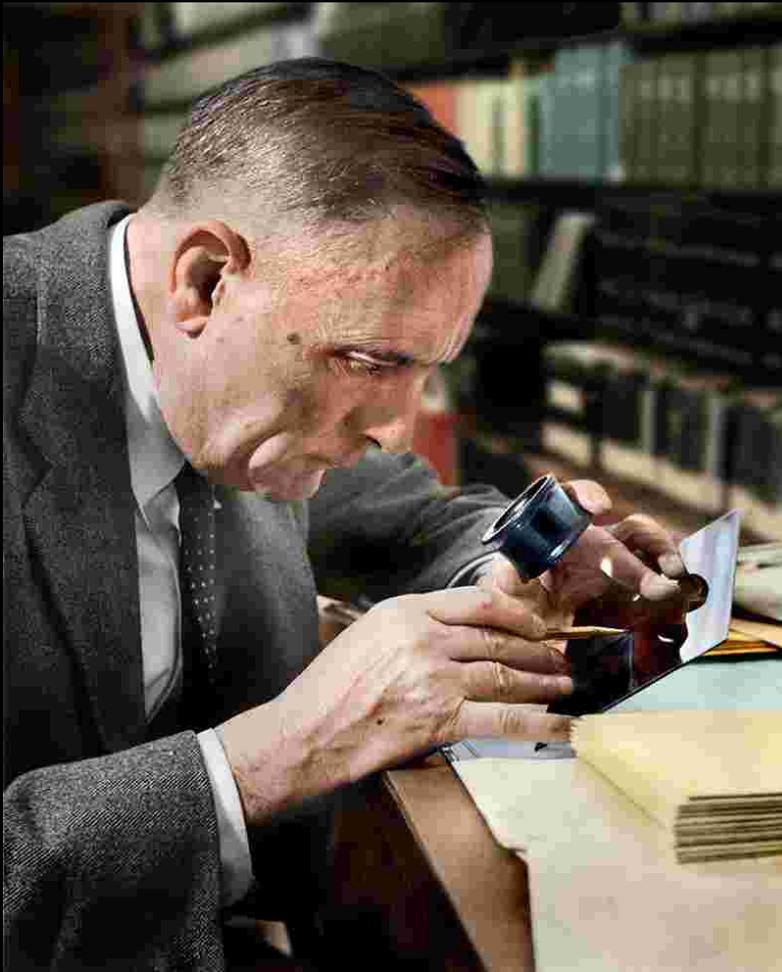
distance  $\approx 100$  parsecs (subject to variation of 50% (dominated by interstellar absorption))

Here is the letter that has destroyed my universe  
 —Shapley, 1924

Letter Hubble à Shapley  
 19/02/1924

# avec les céphéïdes **l'observation** bouleverse les théories

30/12/1924 – 2/01/1925  
LEMAÎTRE assiste à Washington au 33 ième colloque de  
l'American Astronomical Society



Norris Rusell  
( remplaçant Hubble )  
communique  
**Cepheids in  
Spiral Nebulae dans NGC 6822  
et M33 ( le Triangle ) en 1923**

Hubble avec  
le 100-inc-reflector  
du Mont Wilson  
découvre en 1929  
12 céphéïdes dans  
M31 et en appliquant  
la loi Lewitt-Shapley  
en déduit que M31 est  
à 285.000 parsecs

# 2 ième révolution copernicienne



Hubble publie en 1929 « a Spiral Nebula as a Stellar System : Messier 31 »

pour différencier les nébuleuses spirales de notre propre nébuleuse

Hubble invente des « **galaxies** » traduction grecque de « Milky Way » Voie Lactée 1557

# la tournée des observatoires américains

Lemaître obtient une nouvelle bourse du Committee for the Relief in Belgium

**Observatoire Van Vleck** Middeltown éclipse du 24/01/1925

133 ième conférence de l'**American Physical Society** Washington :

Lemaître y présente son étude de l'Univers de de Sitter

première rencontre avec **Hubble à Washington** ( 04/1925 académie des Sciences)  
sur la mesure des céphéïdes

rencontre au **Yerkes Observatory** avec John Comrie sur le calcul numérique

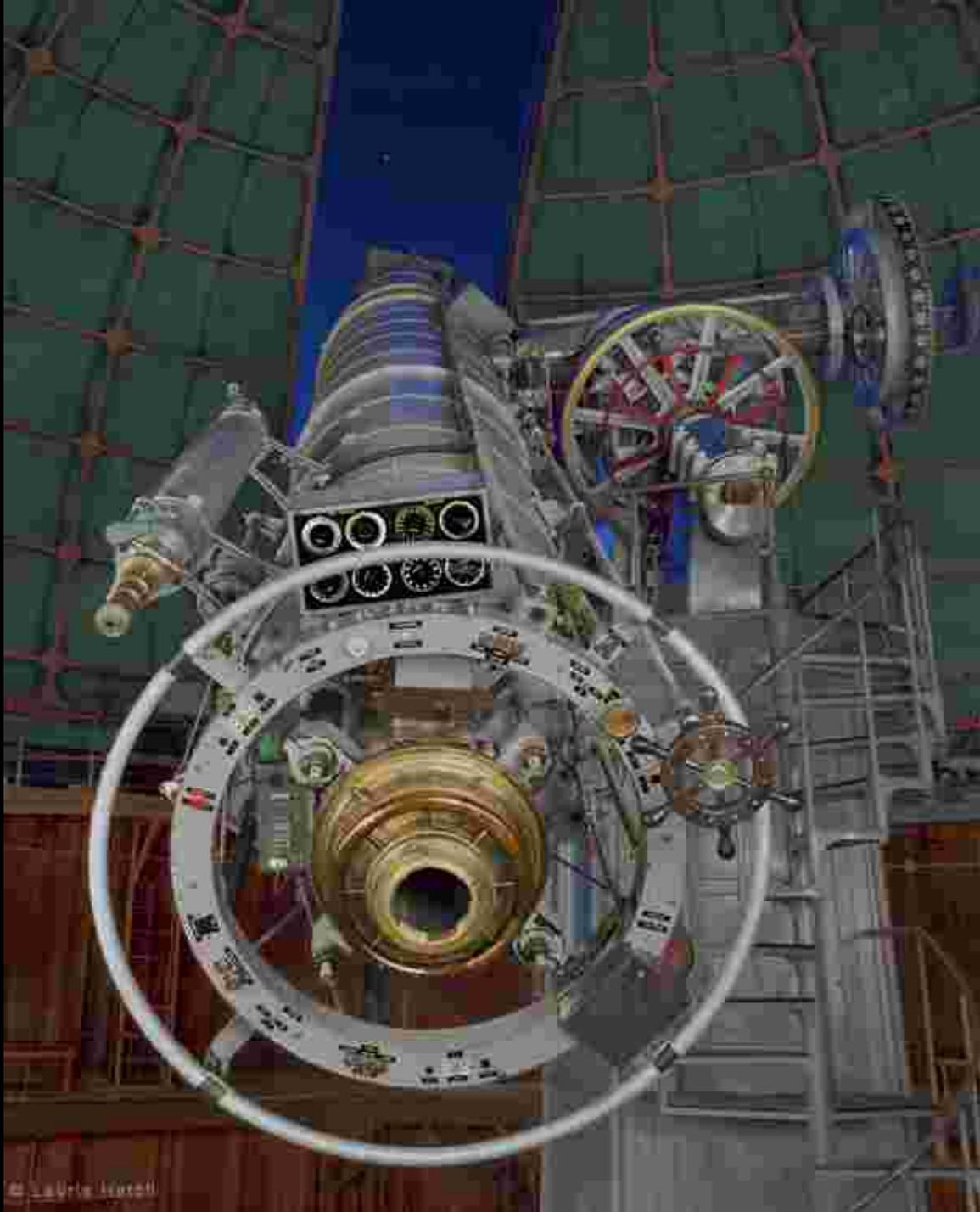
visite **Dominion Observatory** de Victoria et du **Lick Observatory** où furent découvertes  
par analyse spectrale que les nébuleuses sont composées d'étoiles

rencontre en juin 1925 avec **Hubble au Mont Wilson**

rencontre avec **Millikan au Caltech** à Pasadena

**Lowell Observatory** Arizona. Rencontre avec **Slipher** ( mesure des vitesses radiales des  
nébuleuses spirales





Lemaître  
travaille avec  
Comrie à  
Yerkes

22/07/1925

Lemaître repart à Cambridge à l'assemblée générale de l'International Astronomical Union où il rencontre Hubble présenter sa classification des nébuleuses



premiers  
croquis de Hubble

# Hubble's Galaxy Classification Scheme





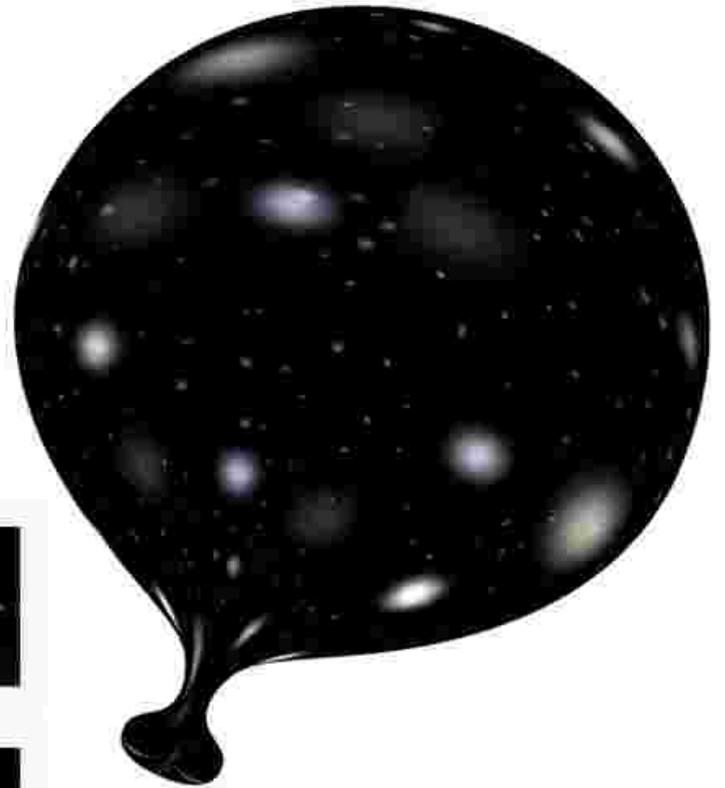
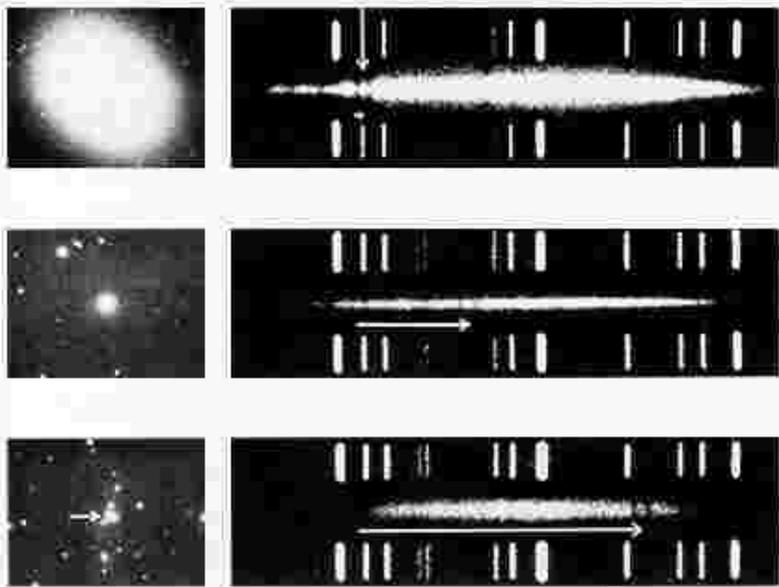
## 1925 la cosmologie se met en place

1923 WEYL trouve dans l'Univers de de Sitter la possibilité de particules qui s'éloignent avec des vitesses proportionnelles à leurs distances mais sans système de coordonnées invariant

**1925** Lemaître trouve une métrique non statique avec un système de coordonnées invariant espace à courbure nulle donnant une relation linéaire entre vitesse et distance  
« Note on DE SITTER's Universe »  
et utilisant la constante cosmologique

1980 Andreï Linde utilisera cette métrique pour sa théorie de l'inflation !  
( et ... aussi Hoyle en 1945 ! )





liaison redshift-expansion

# modèles d'Univers homogènes et isotropes

résolution du système d'équations d'Einstein

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

avec les conditions :

si le contenu matériel est assimilable à un fluide parfait, homogène et sans mouvement de pression  $p$  et de masse volumique

$$p = p_{matière} + p_{rayonnement}$$

$$\rho = \rho_{matière} + \rho_{rayonnement}$$

$g_{\mu\nu}$

la métrique FLRW (ses  $g$  )

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 [dr^2 + \bar{r}^2 d\Omega^2]$$

$$\bar{r} = R_C \sinh(r/R_C)$$

$$d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$

$R_C$  valeur absolue du rayon de courbure

$R(t)$  est le facteur d'échelle

$\bar{r}$  distance du mouvement propre

$$R_0^0 = 3 \frac{\ddot{R}}{R}$$

$$R_s = 6 \frac{\ddot{R}R + \dot{R}^2 + k}{R^2}$$

$$R_1^1 = R_2^2 = R_3^3 = -\frac{\ddot{R}R + 2\dot{R}^2 + 2k}{R^2}$$

conduit aux équations-solutions FL qui lient l'évolution du facteur d'échelle  $R(t)$  aux paramètres physiques  $p$  ( pression) et  $\rho$  ( masse volumique )

## les équations dites de « Fridman-Lemaître »

$$-\frac{k}{R^2} - \frac{\dot{R}^2}{c^2 R^2} - \frac{2\ddot{R}}{Rc^2} + \Lambda = \frac{8\pi G\rho}{c^4} \quad \frac{k}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{c^2 R^2} - \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G\rho}{3c^2} \quad \frac{d(\rho R^3)}{dR} + 3p \frac{R^2}{c^2} = 0$$

avec  $k = +1, 0, -1$  pour les espaces elliptiques, euclidiens ou hyperboliques

Lemaître considère toujours  $k = +1$ , Friedmann considère  $k = +$  ou  $-1$  et  $= 0$



# exploitation des équations Fridman-Lemaître

taux d'expansion  
( constante Hubble )

$$H(t) \doteq \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$$

( voir le site cosmosaf-IAP )

paramètre de  
décélération

$$q(t) \doteq -\frac{\ddot{R}(t)R(t)}{\dot{R}^2(t)}$$

paramètre de densité

$$\Omega_M(t) = \Omega_m(t) + \Omega_r(t) \doteq \frac{8\pi G[\rho_m(t) + \rho_r(t)]}{3H^2(t)}$$

constante cosmologie  
réduite

$$\Omega_\Lambda(t) \doteq \lambda(t) \doteq \frac{\Lambda c^2}{3H^2(t)}$$

$\rho_c$   
densité critique

courbure réduite

$$\Omega_k(t) \doteq -\frac{kc^2}{R^2(t)H^2(t)}$$

$$\Omega_M(t) + \Omega_\Lambda(t) + \Omega_k(t) = 1 \quad \forall t \quad \text{et que} \quad q(t) = \Omega_r(t) + \frac{\Omega_m(t)}{2} - \Omega_\Lambda(t)$$

$$H_0 \doteq 50 h_{50} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \doteq 100 h_{100} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \doteq 62.5 h_{62.5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \dots$$

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^\infty (1+x)^{-1} [\Omega_{r_0}(1+x)^4 + \Omega_{m_0}(1+x)^3 - (\Omega_{M_0} + \Omega_{\Lambda_0} - 1)(1+x)^2 + \Omega_{\Lambda_0}]^{-\frac{1}{2}} dx$$

# la problématique de Lemaître


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

retour en Belgique en 1926–1927 et début de ses enseignements à Louvain  
Il étudie en plus l'origine de l'équation de Schrödinger.

travail sur l'Univers de de Sitter avec données observationnelles  
sur la fuite des galaxies déterminée par le redshift de leur spectre lumineux  
les discussions avec Silberstein montre que l'Univers de de Sitter est un cadre  
mathématique admettant le redshift

MAIS :

l'Univers de de Sitter est vide de matière et sa géométrie est euclidienne  
l'espace-temps d'Einstein ne convient pas non plus puisque rempli de matière  
mais ne rend pas compte du redshift

IL CHERCHE : **Lemaître inclut le terme de pression** contrairement à Einstein,  
De Sitter et Friedmann

**un Univers massif  
non statique emportant avec lui les galaxies dans un mouvement en expansion**

dans sa thèse au MIT GL il cherche une solution intermédiaire entre Einstein et de Sitter

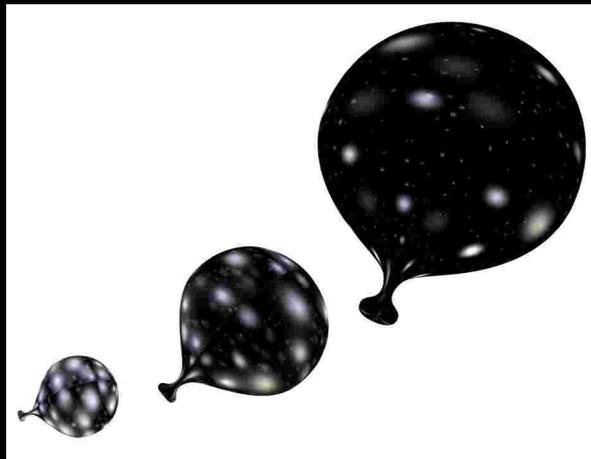
# l'expansion cosmique

celle ci ne se manifeste pas par les mouvements apparents des galaxies  
( comme l'a toujours cru Hubble en invoquant l'effet Doppler  
alors qu'on le crédite, à tort, de l'invention de l'expansion)

selon Lemaître, son caractère général implique  
qu'elle n'est pas une propriété de ces objets  
mais d'un système beaucoup plus global : l'Univers lui même!

Le modèle De Sitter ignore la matière ! Mais admet les vitesses de récessions  
comme conséquence de la gravitation

Le modèle d'Einstein admet la matière, trouve une relation entre la densité et  $R$   
mais n'explique pas les récessions



1927 coup de génie :

# se séparer de l'idée d'Univers statique

contre l'avis des scientifiques suivant l'Univers statique d' Einstein

« Roberston and I had some hesitations to consider non-statical or as Roberston said  
« dynamical solutions » but I was better prepared to accept it following an opinion  
expressed by Eddington »

Il publie

le 25 avril 1927 dans « les Annales de la Société Scientifique de Bruxelles »

« Un Univers homogène de masse constante  
et de rayon croissant, rendant  
compte de la vitesse radiale  
des nébuleuses extra-galactiques »

texte fondamental de cosmologie ... toujours d'actualité

en se fondant sur les mesures de vitesses d'éloignement des galaxies de Vesto Slipher et de leur distances établies par Edwin Hubble Georges Lemaître est le premier à établir le rapport constant entre distance et vitesse d'éloignement.

Il fournit une évaluation de cette constante, que l'on appelle communément la constante de Hubble. Cette estimation est fournie dans l'article de 1927, mais celui-ci est rédigé en français. Georges Lemaître – ou Eddington !– traduira celui-ci en anglais en 1931, **mais en omettant les paragraphes relatifs à la constance du rapport distance/vitesse.**

La communauté scientifique retiendra donc l'estimation publiée par Hubble en 1929.

les observations actuelles concordent approximativement vers une valeur tournant autour de 73 (km/s)/Mpc.

Cela signifie qu'une galaxie située à 1 mégaparsec (environ 3,26 millions d'années-lumière) de l'observateur s'éloigne du fait de l'expansion de l'univers (et donc hors effet d'un mouvement propre de l'objet, négligeable à très grande distance) à une vitesse de 73 km/s. Une galaxie située à 10 Mpc s'éloigne à une vitesse de 730 km/s



G. Lemaître, *L'univers en expansion*. Ann. Soc. Sci. de Bruxelles 47, 49 (1927).

Translated in MNRAS 91, 483 (1931)

Dear Professor Eddington

I just read the February N° of the Observatory and the ~~discussions~~ your suggestion of the investigating the ~~intermediate~~ non statistical intermediary solution between of Einstein and de Sitter.

I made this investigation two years ago. I consider an universe of curvature constant in space but ~~variable~~ <sup>variable</sup> with time. And I looked for a solution of a solution for which the apparent receding motion of the nebulae does not ~~come from~~ <sup>always</sup> a receding one from some law and from time minus infinity to infinity.

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

The result is as follows:

~~The~~ the receding motion of the nebulae is a measure of the initial or more accurate radius for time  $t=0$  by the formula

$$R_0 \approx \frac{4c}{\sqrt{3}} \text{ strictly } \left[ \frac{R_0}{2c} = \frac{1}{3R_0} + \frac{1}{R_0} = \frac{2}{3R_0} \right]$$

(see Paterle's work)

Lemaître, who had been for a short time a post-doctoral student of Eddington, read this remark in a report on the meeting published in Observatory, and wrote to Eddington pointing out his 1927 paper. Eddington had seen that paper, but had completely forgotten about it. But now he was greatly impressed and recommended Lemaître's work in a letter to Nature. He also arranged for a translation which appeared in MNRAS. Eddington also "pointed out that it was immediately deducible from his [Lemaître's] formulae that Einstein's world is unstable, so that an expanding or a contracting universe is an inevitable result of Einstein's law of gravitation."

Lemaître écrit à Eddington les raisons de sa publication

# ANNALES

DE LA

## SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE

DE BRUXELLES

Un univers homogène de masse constante  
et de rayon croissant, rendant compte  
de la vitesse radiale des nébuleuses  
extra-galactiques

Note de M. l'Abbé G. LEMAITRE

LOUVAIN

Secrétariat de la Société Scientifique  
11, RUE DES RÉCOLLETS, 11  
Chèques postaux 38022, F. Willaert

PARIS

Les Presses Universitaires de France  
49, BOULEVARD S<sup>t</sup> MICHEL, 49  
Compte chèques postaux 392-33

1927

Documents provenant des

Archives Lemaître  
Université catholique de Louvain  
Institut d'astronomie et de géophysique G. Lemaître  
2, Chemin du Cyclotron  
B-1348 Louvain-la-Neuve - Belgique  
☎ +32 (0)10 47 32 97 FAX : +32 (0)10 47 47 22

UN UNIVERS HOMOGENE <sup>et croissant</sup> DE RAYON ~~VARIABLE~~ DE MASSE  
CONSTANTE, RENDANT COMPTE DE LA VITESSE RADIALE DES NEBULEU-  
SES EXTRA-GALACTIQUES.

I - GENERALITES

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 ~~il~~ toutes les positions  
dans l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de  
gravité. Le rayon <sup>R</sup> 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  $2\pi R$ , le volume total de l'espace  
est fini et égal à  $\frac{4}{3}\pi R^3$ , les droites sont des lignes  
fermées parcourant tout l'espace sans rencontrer de  
frontière.

Nous considérons l'espace simplement elliptique, c'est à  
dire sans antipodes.

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 trouvons  
en un point de l'univers doué de propriétés spéciales.

L'autre solution est celle d'Einstein. Elle ~~xx~~  
~~xxxxxxxx~~ tient compte du fait évident que la densité  
de la matière n'est pas nulle et elle conduit à une relation

R-103

« Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques

«

The image shows a handwritten equation on a chalkboard:  $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} \cdot R$ . The equation is written in white chalk on a dark background. A white arrow points from the text below to the metric tensor  $g$  in the equation.

l'inconnue de l'équation d'Einstein est la métrique :  $g$

Lemaître reprend la solution d'Einstein sphérique et statique rempli d'un fluide parfait de densité et de pression nulle mais avec la métrique :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R_E^2 d^2 \text{ où } R_E \text{ est le rayon constant de l'Univers}$$

$$\text{avec } R_E = 1 / (\Lambda_E)^{1/2}$$

$$\Lambda_E = \text{constante cosmologique } \Lambda_E = 4 G \rho^2 c^2$$

$d$  élément de longueur de la sphère en 3D rayon 1

il suppose que le rayon de l'Univers est variable avec le temps  $t$  sa métrique est donc :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) d^2$$

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

Note de M. l'Abbé G. LEMAITRE

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  $\pi R$ , 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 <sup>(1)</sup>.

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.

L'autre solution est celle d'EINSTEIN. Elle tient compte du fait évident que la densité de la matière n'est pas nulle et elle conduit à une relation entre cette densité et le rayon de l'univers. Cette relation a fait prévoir l'existence de masses énormément supérieures à tout ce qui était connu lorsque la théorie a été pour la première fois comparée avec les faits. Ces masses ont été depuis découvertes lorsque les distances et les dimensions des nébuleuses extra-galactiques ont pu être établies. Le rayon de l'univers calculé par la formule d'Einstein est d'après les données récentes quelques

<sup>(1)</sup> Nous considérons l'espace simplement elliptique, c'est-à-dire sans antipodes.

centaines de fois plus grand que la distance des objets les plus éloignés photographiés dans nos télescopes <sup>(1)</sup>.

Les deux solutions ont donc leurs avantages. L'une s'accorde avec l'observation des vitesses radiales des nébuleuses, l'autre tient compte de la présence de la matière et donne une relation satisfaisante entre le rayon de l'univers et la masse qu'il contient. Il semble désirable d'obtenir une solution intermédiaire qui pourrait combiner les avantages de chacune d'elles.

A première vue, un tel intermédiaire n'existe pas. Un champ de gravitation statique et de symétrie sphérique n'admet que deux solutions, celle d'Einstein et celle de de Sitter, si la matière est uniformément répartie et n'est soumise à aucune pression ou tension intérieure. L'Univers de de Sitter est vide, celui d'Einstein a pu être décrit comme contenant autant de matière qu'il en peut contenir; il est étonnant que la théorie ne puisse fournir un juste milieu entre ces deux extrêmes.

Le paradoxe s'éclaircit lorsqu'on se rend compte que la solution de de Sitter ne répond pas à toutes les nécessités du problème <sup>(2)</sup>. L'espace y est bien homogène, de courbure positive constante; l'espace-temps aussi est homogène, tous les points de l'univers sont parfaitement équivalents; mais la division de l'espace-temps en espace et en temps ne respecte plus l'homogénéité. Les coordonnées choisies introduisent un centre auquel rien ne correspond dans la réalité; un point immobile au centre de l'espace décrit une géodésique de l'univers, un point immobile autre part

<sup>(1)</sup> Cf. Hubble E. Extra-galactic nebulae, *Ap. J.*, vol. 64, p. 321, 1926. *M. Wilson Contr.* No 324.

<sup>(2)</sup> Cf. K. LANCZOS. — Bemerkung zur de Sitterschen Welt. *Phys. Zeitschr.*, vol. 23, p. 539, 1922, et H. WEYL. Zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Id.*, vol. 24, p. 230, 1923. Nous suivons ici le point de vue de Lanczos. Les lignes d'univers des nébuleuses forment une gerbe de centre idéal et d'hyperplan axial réel; l'espace normal à ces lignes d'univers est formé par les hypersphères équidistantes au plan axial. Cet espace est elliptique, son rayon variable étant minimum à l'instant correspondant au plan axial. Dans l'hypothèse de Weyl, les lignes d'univers sont parallèles dans le passé; les hypersurfaces normales représentant l'espace sont des horosphères, la géométrie de l'espace est donc euclidienne. La distance spatiale entre les nébuleuses augmente au fur et à mesure que les géodésiques parallèles qu'elles décrivent s'écartent l'une de l'autre, proportionnellement à  $e^{t/R}$ , où  $t$  est le temps propre et  $R$  le rayon de l'univers. L'effet Doppler est égal à  $v/R$ , où  $v$  est la distance de la source à l'instant de l'observation. Cf. G. LEMAITRE. Note on de Sitter's universe. *Journal of mathematics and physics*, vol. 4, no 3, May 1925, ou *Publications du Laboratoire d'Astronomie et de Géodésie de l'Université de Louvain*, vol. 2, p. 37, 1925. Pour la discussion de la partition de de Sitter, voir P. DU VAL: Geometrical note on de Sitter's world. *Phil. Mag.* (6), vol. 47, p. 930, 1924. L'espace est formé d'hyperplans normaux à une droite; temporelle décrite par le centre introduit, les trajectoires des nébuleuses sont les trajectoires orthogonales de ces plans, elles ne sont généralement plus des géodésiques et elles tendent à devenir des lignes de longueur nulle lorsqu'ou s'approche de l'horizon du centre, c'est-à-dire de l'hyperplan polaire de l'axe central par rapport à l'absolu.

qu'au centre ne décrit pas une géodésique de l'univers. Le choix des coordonnées rompt donc l'homogénéité qui existait dans les données du problème, de là proviennent les résultats paradoxaux qui apparaissent à l'« horizon » du centre. Lorsqu'on introduit des coordonnées et une division correspondante de l'espace et du temps respectant l'homogénéité de l'univers, on trouve que le champ n'est plus statique, on obtient un univers de même forme que celui d'Einstein, mais où le rayon de l'espace au lieu de demeurer invariable varie avec le temps suivant une loi particulière (1).

Pour trouver une solution présentant simultanément les avantages de celle d'Einstein et de celle de de Sitter, nous sommes ainsi conduits à étudier un univers d'Einstein où le rayon de l'espace (ou de l'univers) varie d'une façon quelconque.

2. UNIVERS D'EINSTEIN A RAYON VARIABLE. ÉQUATIONS DU CHAMP DE GRAVITATION. CONSERVATION DE L'ÉNERGIE.

Tout comme pour la solution d'Einstein, nous assimilons l'univers à un gaz très raréfié dont les nébuleuses extra-galactiques forment les molécules ; nous les supposons assez nombreuses pour qu'un volume petit par rapport à l'ensemble de l'univers contienne assez de nébuleuses pour que nous puissions parler de la densité de la matière. Nous ignorons l'influence possible de condensations locales. De plus, nous supposons que la répartition des nébuleuses est uniforme et donc que la densité est indépendante de la position.

Pour une variation arbitraire du rayon de l'univers la densité, uniforme dans l'espace, varie avec le temps. De plus, la matière est, en général, soumise à des tensions qui, à cause de l'homogénéité, se réduisent à une simple pression uniforme dans l'espace et variable avec le temps. La pression est égale aux deux tiers de l'énergie cinétique des molécules, elle est négligeable vis-à-vis de l'énergie condensée dans la matière, il en est de même des pressions intérieures des nébuleuses ou des étoiles qu'elles contiennent ; nous sommes donc conduits à poser  $p = 0$ . Peut-être

(1) Si on se borne à deux dimensions, une d'espace et une de temps, la division d'espace et de temps utilisée par de Sitter peut être représentée sur une sphère : les lignes d'espace sont fournies par un système de grands cercles se coupant sur un même diamètre et les lignes temporelles sont les parallèles coupant normalement les lignes spatiales. Un de ces parallèles est un grand cercle et donc une géodésique, il correspond au centre de l'espace, le pôle de ce grand cercle est un point singulier correspondant à l'horizon du centre. La représentation doit naturellement être étendue à quatre dimensions et la coordonnée temporelle doit être supposée imaginaire, mais le défaut d'homogénéité résultant du choix des coordonnées subsiste. Les coordonnées respectant l'homogénéité reviennent à prendre pour lignes temporelles un système de méridiens et pour lignes spatiales les parallèles correspondants, alors le rayon de l'espace varie avec le temps.

faudrait-il tenir compte de la pression de radiation de l'énergie rayonnante circulant dans l'espace ; cette énergie est fort faible, mais elle est répartie dans tout l'espace et fournit peut-être une contribution importante à l'énergie moyenne. Nous garderons le terme  $p$  dans les équations générales en l'interprétant comme la pression de radiation moyenne de la lumière, mais nous poserons  $p = 0$ , lorsque nous en viendrons à l'application aux phénomènes astronomiques.

Nous désignons par  $\rho$  la densité de l'énergie totale, la densité de l'énergie rayonnante sera  $3p$  et la densité de l'énergie concentrée dans la matière est  $\delta = \rho - 3p$ .

Il faut identifier  $\rho$  et  $-p$  avec les composantes  $T^4_4$  et  $T^1_1 = T^2_2 = T^3_3$  du tenseur d'énergie matérielle et  $\delta$  avec  $T$ . Calculons les composantes du tenseur de Riemann contracté pour un univers d'intervalle

$$ds^2 = - R^2 d\sigma^2 + dt^2 \tag{1}$$

$d\sigma$  est l'élément de longueur d'un espace de rayon égal à un ; le rayon  $R$  de l'espace est une fonction du temps. Les équations du champ de gravitation s'écrivent

$$3 \frac{R''}{R} + \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho \tag{2}$$

et

$$2 \frac{R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} + \frac{1}{R^2} = \lambda - \kappa\rho \tag{3}$$

Les accents désignent des dérivées par rapport à  $t$  ;  $\lambda$  est la constante cosmologique dont la valeur est inconnue et  $\kappa$  la constante d'Einstein égale à  $1,87 \times 10^{-27}$  en unités C. G. S. ( $8\pi$  en unités naturelles).

Les quatre identités exprimant la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie se réduisent ici à

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{3R'}{R} (\rho + p) = 0 \tag{4}$$

qui exprime la conservation de l'énergie. Cette équation peut donc remplacer (3). Elle est susceptible d'une interprétation intéressante. Introduisant le volume de l'espace  $V = \pi^2 R^3$ , elle peut s'écrire

$$d(V\rho) + p dV = 0 \tag{5}$$

et elle exprime que la variation de l'énergie totale plus le travail effectué par la pression de radiation est égale à zéro.

3. CAS OÙ LA MASSE TOTALE DE L'UNIVERS DEMEURE CONSTANTE.

Cherchons une solution pour laquelle la masse totale  $M = V\delta$  demeure constante. Nous pourrons alors poser

$$\kappa\delta = \frac{\alpha}{R^3} \quad (5)$$

où  $\alpha$  est une constante. Tenant compte de la relation

$$\rho = \delta + 3p$$

existant entre les diverses sortes d'énergie, le principe de conservation de l'énergie devient

$$3 d(pR^3) + 3p R^2 dR = 0 \quad (7)$$

dont l'intégration est immédiate;  $\beta$  désignant une constante d'intégration, nous avons

$$\kappa p = \frac{\beta}{R^4} \quad (8)$$

et donc

$$\kappa\rho = \frac{\alpha}{R^3} + \frac{3\beta}{R^4} \quad (9)$$

Substituant dans (2), nous avons à intégrer

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\kappa\rho}{3} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\alpha}{3R^3} + \frac{\beta}{R^4} \quad (10)$$

ou

$$t = \int \frac{dR}{\sqrt{\frac{\lambda R^2}{3} - 1 + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^2}}} \quad (11)$$

Pour  $\alpha$  et  $\beta$  égaux à zéro, nous trouvons la solution de de Sitter (1)

$$R = \sqrt{\frac{3}{\lambda}} \cosh \sqrt{\frac{\lambda}{3}} (t - t_0) \quad (12)$$

La solution d'Einstein s'obtient en posant  $\beta = 0$  et  $R$  constant. Posant  $R' = R'' = 0$  dans (2) et (3), il vient

$$\frac{1}{R^2} = \lambda \quad \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho \quad \rho =$$

donc

$$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad \kappa\delta = \frac{2}{R^2} \quad (13)$$

et d'après (6)

$$\alpha = \kappa\delta R^3 = \frac{2}{\sqrt{\lambda}} \quad (14)$$

(1) Cf. LANZOS, l. c.

La solution d'Einstein ne résulte pas de la seule relation (14), il faut en outre que la valeur initiale de  $R'$  soit nulle. En effet, écrivant pour simplifier les écritures

$$\lambda = \frac{1}{R_0^2} \quad (15)$$

et posant dans (14)  $\beta = 0$  et  $\alpha = 2R_0$ , il vient

$$t = R_0 \sqrt{3} \int \frac{dR}{R - R_0} \sqrt{\frac{R}{R + 2R_0}} \quad (16)$$

Pour cette solution les deux équations (13) ne seront naturellement plus vérifiées. Si nous écrivons

$$\kappa\delta = \frac{2}{R_E^2} \quad (17)$$

nous aurons d'après (14) et (15)

$$R^3 = R_E^2 R_0 \quad (18)$$

La valeur de  $R_E$ , rayon de l'univers déduit de la densité moyenne par la formule d'Einstein (17), a été estimée par Hubble à

$$R_E = 8,5 \times 10^{23} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^{10} \text{ parsecs} \quad (19)$$

Nous allons voir que la valeur de  $R_0$  peut se déduire de la vitesse radiale des nébuleuses;  $R$  pourra alors être calculé par la formule (18). Nous montrerons ensuite qu'une solution introduisant une relation sensiblement différente de (14) conduirait à des conséquences difficilement admissibles.

4. EFFET DOPPLER DÙ A LA VARIATION DU RAYON DE L'UNIVERS.

D'après la forme (1) de l'intervalle d'univers, l'équation d'un rayon lumineux est

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{R} \quad (20)$$

où  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont les valeurs d'une coordonnée caractérisant la position dans l'espace. Nous pouvons parler du point  $\sigma_2$  où nous supposons localisé l'observateur et du point  $\sigma_1$  où se trouve la source de lumière.

Un rayon émis un peu plus tard partira de  $\sigma_1$  au temps  $t_1 + \delta t_1$  et arrivera en  $\sigma_2$  au temps  $t_2 + \delta t_2$ . Nous aurons donc

$$\frac{\delta t_2}{R_2} - \frac{\delta t_1}{R_1} = 0, \quad \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (21)$$

où  $R_1$  et  $R_2$  désignent respectivement les valeurs de  $R$  aux temps  $t_1$  et  $t_2$ .  $t$  est le temps propre; si  $\delta t_1$  est la période de la lumière émise,  $\delta t_2$  est la

La solution d'Einstein ne résulte pas de la seule relation (14), il faut en outre que la valeur initiale de  $R'$  soit nulle. En effet, écrivant pour simplifier les écritures

$$\lambda = \frac{1}{R_0^2} \quad (15)$$

et posant dans (11)  $\beta = 0$  et  $\alpha = 2R_0$ , il vient

$$t = R_0 \sqrt{3} \int \frac{dR}{R - R_0} \sqrt{\frac{R}{R + 2R_0}} \quad (16)$$

Pour cette solution les deux équations (13) ne seront naturellement plus vérifiées. Si nous écrivons

$$\kappa \delta = \frac{2}{R_E^2} \quad (17)$$

nous aurons d'après (14) et (15)

$$R^3 = R_E^2 R_0 \quad (18)$$

La valeur de  $R_E$ , rayon de l'univers déduit de la densité moyenne par la formule d'Einstein (17), a été estimée par Hubble à

$$R_E = 8,5 \times 10^{23} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^{10} \text{ parsecs} \quad (19)$$

Nous allons voir que la valeur de  $R_0$  peut se déduire de la vitesse radiale des nébuleuses ;  $R$  pourra alors être calculé par la formule (18). Nous montrerons ensuite qu'une solution introduisant une relation sensiblement différente de (14) conduirait à des conséquences difficilement admissibles.

#### 4. EFFET DOPPLER DÙ A LA VARIATION DU RAYON DE L'UNIVERS.

D'après la forme (1) de l'intervalle d'univers, l'équation d'un rayon lumineux est

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{R} \quad (20)$$

où  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont les valeurs d'une coordonnée caractérisant la position dans l'espace. Nous pouvons parler du point  $\sigma_2$  où nous supposons localisé l'observateur et du point  $\sigma_1$  où se trouve la source de lumière.

Un rayon émis un peu plus tard partira de  $\sigma_1$  au temps  $t_1 + \delta t_1$  et arrivera en  $\sigma_2$  au temps  $t_2 + \delta t_2$ . Nous aurons donc

$$\frac{\delta t_2}{R_2} - \frac{\delta t_1}{R_1} = 0, \quad \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (21)$$

où  $R_1$  et  $R_2$  désignent respectivement les valeurs de  $R$  aux temps  $t_1$  et  $t_2$ .  $t$  est le temps propre ; si  $\delta t_1$  est la période de la lumière émise,  $\delta t_2$  est la

période de la lumière reçue et  $\delta t_1$  peut encore être considéré comme la période d'une lumière émise dans les mêmes conditions dans le voisinage de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

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

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

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

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

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr}$$

loi de Hubble !  
en 1927 <sup>(23)</sup>

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg <sup>(1)</sup>.

La grandeur apparente  $m$  de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur — 15,2 à 10 parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance  $r$  exprimée en parsecs est alors donnée par la formule  $\log r = 0,2m + 4,04$ .

On trouve une distance de l'ordre de  $10^6$  parsecs, variant de quelques dixièmes à 3,3 millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de 0,4 à 2,5 fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de 300 Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à  $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ , où  $r$  est la distance en millions de parsecs.

<sup>(1)</sup> Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. *Ap. J.* Vol. 61, p. 353, 1925. *Mc Wilson Contr.* N° 292.

période de la lumière reçue et  $\delta l_1$  peut encore être considéré comme la période d'une lumière émise dans les mêmes conditions dans le voisinage de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta l_2}{\delta l_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

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

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

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

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr} \quad (23)$$

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg (1).

La grandeur apparente  $m$  de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur - 15,2 à 10 parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance  $r$  exprimée en parsecs est alors donnée par la formule  $\log r = 0,2m + 4,04$ .

On trouve une distance de l'ordre de  $10^6$  parsecs, variant de quelques dixièmes à 3,3 millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de 0,4 à 2,5 fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de 300 Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à  $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ , où  $r$  est la distance en millions de parsecs.

(1) Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. *Ap. J.* Vol. 61, p. 353, 1925. *M. Wilson Contr.* N° 292.

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

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

Cette relation nous permet de calculer  $R_0$ . Nous avons en effet par (16)

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{R_0 \sqrt{3}} \sqrt{1 - 3y^2 + 2y^3} \quad (25)$$

où nous avons posé

$$y = \frac{R_0}{R} \quad (26)$$

D'autre part, d'après (18) et (26),

$$R_0^2 = R_*^2 y^3 \quad (27)$$

et donc

$$3 \left( \frac{R'}{R} \right)^2 R_*^2 = \frac{1 - 3y^2 + 2y^3}{y^3} \quad (28)$$

Introduisant les valeurs numériques de  $\frac{R'}{R}$  (24) et de  $R_*$  (19), il vient :

$$y = 0,0465.$$

On a alors :

$$R = R_* \sqrt{y} = 0,215 R_* = 1,83 \times 10^{28} \text{ cm.} = 6 \times 10^9 \text{ parsecs}$$

$$R_0 = Ry = R_* y^{\frac{3}{2}} = 8,5 \times 10^{28} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^8 \text{ parsecs}$$

$$= 9 \times 10^8 \text{ années de lumière.}$$

(1) Il n'est pas tenu compte de N. G. C. 5194 qui est associé à N. G. C. 5195. L'introduction des nuées de Magellan serait sans influence sur le résultat.

(2) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à  $1,16 \times 10^6$  parsecs, 575 Km./sec à  $10^6$  parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre  $v$  et  $r$  et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande (300 Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativistique de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer  $v$  proportionnel à  $r$  et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport  $v/r$ . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world *M. N.*, vol. 84, p. 747, 1924, et STRÖMBERG, *I. C.*

L'intégrale (16) se calcule facilement. Posant

$$x^2 = \frac{R}{R + 2R_0} \quad (29)$$

elle s'écrit

$$t = R_0 \sqrt{3} \int \frac{4x^2 dx}{(1-x^2)(3x^2-1)} = R_0 \sqrt{3} \log \frac{1+x}{1-x} + R_0 \log \frac{\sqrt{3}x-1}{\sqrt{3}x+1} + C \quad (30)$$

Si nous désignons par  $\sigma$  la fraction du rayon de l'univers parcourue par la lumière au temps  $t$ , nous avons aussi par (20) :

$$\sigma = \int \frac{dt}{R} = \sqrt{3} \int \frac{2dx}{3x^2-1} = \log \frac{\sqrt{3}x-1}{\sqrt{3}x+1} + C' \quad (31)$$

Nous donnons ci-dessous une table de  $\sigma$  et  $t$  en fonction de  $\frac{R}{R_0}$ .

$\frac{R}{R_0}$	$\frac{t}{R_0}$	$\sigma$		$\frac{v}{c}$
		RADIANS	DEGRÉS	
1	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$	19
2	-4,31	-0,889	-51°	9
3	-3,42	-0,521	-30°	5½
4	-2,86	-0,359	-21°	4
5	-2,45	-0,266	-15°	3
10	-1,21	-0,087	-5°	1
15	-0,50	-0,029	-1°7	½
20	0	0	0	0
25	0,39	0,017	1°	
$\infty$	$\infty$	0,087	5°	

Les constantes d'intégration sont choisies de telle sorte que  $\sigma$  et  $t$  soient nuls pour  $\frac{R}{R_0} = 20$  au lieu de 21,5. La dernière colonne donne l'effet Doppler calculé par la formule (22). D'après la formule approchée (23)  $\frac{v}{c}$  serait proportionnel à  $r$  et donc à  $\sigma$ . L'erreur commise en adoptant cette équation n'est que de cinq millièmes pour  $\frac{v}{c} = 1$ . Elle peut donc être employée tant que le spectre reste visible.

### 5. SIGNIFICATION DE LA RELATION (14).

Nous avons introduit la relation (14) entre les constantes  $\alpha$  et  $\lambda$  d'après la solution d'Einstein. Cette relation est la condition pour que l'expression sous le radical au dénominateur de l'intégrale (11) admette une racine double  $R_0$  donnant par intégration un terme logarithmique. Pour des racines simples, on obtiendrait par intégration une racine carrée et la valeur de  $R$  correspondante serait un minimum comme dans la solution (12) de de Sitter. Ce minimum se produirait généralement à une époque de l'ordre de  $R_0$ , soit 10' années, c'est-à-dire à une époque récente à l'échelle de l'évolution stellaire. Il semble donc que la relation existant entre les constantes  $\alpha$  et  $\lambda$  doit être voisine de (14) pour laquelle ce minimum est rejeté à l'époque moins l'infini (1).

### 6. CONCLUSION.

Nous avons obtenu une solution qui vérifie les conditions suivantes :

1. La masse de l'univers est constante et est liée à la constante cosmologique par la relation d'Einstein

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2\pi^2}{\kappa M} = \frac{1}{R_0}$$

2. Le rayon de l'univers croît sans cesse depuis une valeur asymptotique  $R_0$  pour  $t = -\infty$ .

3. L'éloignement des nébuleuses extra-galactiques est un effet cosmique dû à l'expansion de l'espace et permettant de calculer le rayon  $R_0$  par les formules (24) et (25) ou approximativement par  $R_0 = \frac{rc}{v\sqrt{3}}$ .

4. Le rayon de l'univers est du même ordre de grandeur que le rayon  $R_E$  déduit de la densité par la formule d'Einstein. On a

$$R = R_E \sqrt[3]{\frac{R_0}{R_E}} = \frac{1}{5} R_E$$

Cette solution concilie les avantages de celles de de Sitter et d'Einstein.

Remarquons que la plus grande partie de l'univers est à jamais hors de notre atteinte. La portée du grand télescope du Mont Wilson est estimée par Hubble à  $5 \times 10^7$  parsecs soit  $\frac{1}{120}R$ , l'effet Doppler correspondant est déjà de 3000 Km/sec. Pour une distance de 0,087  $R$ , il est égal à un, toute la lumière visible est rejetée dans l'infra-rouge. Il est impossible que se

(1) Si les racines positives devenaient imaginaires, le rayon varierait à partir de zéro, la variation étant ralentie au voisinage du module des racines imaginaires. Pour une relation sensiblement différente de (14), ce ralentissement serait faible et la durée de l'évolution à partir de  $R = 0$  serait encore de l'ordre de  $R_0$ .

## 5. SIGNIFICATION DE LA RELATION (14).

Nous avons introduit la relation (14) entre les constantes  $\alpha$  et  $\lambda$  d'après la solution d'Einstein. Cette relation est la condition pour que l'expression sous le radical au dénominateur de l'intégrale (11) admette une racine double  $R_0$  donnant par intégration un terme logarithmique. Pour des racines simples, on obtiendrait par intégration une racine carrée et la valeur de  $R$  correspondante serait un minimum comme dans la solution (12) de de Sitter. Ce minimum se produirait généralement à une époque de l'ordre de  $R_0$ , soit 10<sup>10</sup> années, c'est-à-dire à une époque récente à l'échelle de l'évolution stellaire. Il semble donc que la relation existant entre les constantes  $\alpha$  et  $\lambda$  doit être voisine de (14) pour laquelle ce minimum est rejeté à l'époque moins l'infini (1).

## 6. CONCLUSION.

Nous avons obtenu une solution qui vérifie les conditions suivantes :

1. La masse de l'univers est constante et est liée à la constante cosmologique par la relation d'Einstein

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2\pi^2}{\kappa M} = \frac{1}{R_0}$$

2. Le rayon de l'univers croît sans cesse depuis une valeur asymptotique  $R_0$  pour  $t = -\infty$ .

3. L'éloignement des nébuleuses extra-galactiques est un effet cosmique dû à l'expansion de l'espace et permettant de calculer le rayon  $R_0$  par les formules (24) et (25) ou approximativement par  $R_0 = \frac{rc}{v\sqrt{3}}$ .

4. Le rayon de l'univers est du même ordre de grandeur que le rayon  $R_E$  déduit de la densité par la formule d'Einstein. On a

$$R = R_E \sqrt[3]{\frac{R_0}{R_E}} = \frac{1}{5} R_E$$

Cette solution concilie les avantages de celles de de Sitter et d'Einstein.

Remarquons que la plus grande partie de l'univers est à jamais hors de notre atteinte. La portée du grand télescope du Mont Wilson est estimée par Hubble à  $5 \times 10^7$  parsecs soit  $\frac{1}{120}R$ , l'effet Doppler correspondant est déjà de 3000 Km/sec. Pour une distance de  $0,087R$ , il est égal à un, toute la lumière visible est rejetée dans l'infra-rouge. Il est impossible que se

(1) Si les racines positives devenaient imaginaires, le rayon varierait à partir de zéro, la variation étant ralentie au voisinage du module des racines imaginaires. Pour une relation sensiblement différente de (14), ce ralentissement serait faible et la durée de l'évolution à partir de  $R = 0$  serait encore de l'ordre de  $R_0$ .

forment des images fantômes des nébuleuses ou des soleils parce que, si même aucune absorption ne se produisait, ces images seraient rejetées de plusieurs octaves dans l'infra-rouge et ne pourraient être observées.

Il resterait à se rendre compte de la cause de l'expansion de l'univers. Nous avons vu que la pression de radiation travaille lors de l'expansion. Ceci semble suggérer que cette expansion a été produite par la radiation elle-même. Dans un univers statique la lumière émise par la matière parcourt l'espace fermé, revient à son point de départ et s'accumule sans cesse. Il semble que là doit être cherchée l'origine de la vitesse d'expansion  $R/R$  qu'Einstein supposait nulle et qui dans notre interprétation est observée comme vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques.

et donc

$$\kappa p = \frac{\alpha}{R^3} + \frac{3\beta}{R^4} \quad (9)$$

Substituant dans ~~la~~ (2), nous avons à intégrer

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\kappa p}{3} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\alpha}{3R^3} + \frac{\beta}{R^4} \quad (10)$$

32

ou

$$t = \int \frac{dR}{\sqrt{\frac{\lambda R^2}{3} - 1 + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^2}}} \quad (11)$$

~~Négliger la pression de radiation revient à poser  $\beta = 0$~~

~~Pour  $\alpha$  et  $\beta$  égaux à zéro, nous trouvons la solution de de Sitter~~

$$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cosh \frac{(t-t_0)}{\sqrt{\lambda}} \quad (12)$$

~~Pour R constant et p nul, nous obtenons la solution d'Einstein~~

$$\kappa p = \kappa \delta = \frac{2}{R^2}, \quad \lambda = \frac{1}{R^2}, \quad \alpha = \frac{2}{R^2} \quad (13)$$

~~Pour  $\alpha$  compris entre 0 et  $\frac{2}{\sqrt{\lambda}}$ , nous avons une solution intermédiaire entre celle d'Einstein et celle de de Sitter pour laquelle la masse totale de l'univers demeure constante.~~

*$\alpha = \frac{2}{\sqrt{\lambda}}$  est la limite de  $R^2$  différentiel  $\alpha = 0$*

#### 4 - EFFET DOPPLER DU A LA VARIATION DU RAYON DE L'UNIVERS -VERS.

Le principal intérêt de la solution de de Sitter est d'expliquer la vitesse d'éloignement des nébuleuses comme un effet cosmique. Calculons donc cet effet ~~particulier~~ dans le cas général où le rayon varie d'une façon quelconque

D'après la forme (i) de l'intervalle d'Univers, l'équation d'un rayon lumineux est

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^4} \quad (14)$$

Einstein, De Sitter et Friedmann avaient pris pour hypothèse :  
le terme de pression  $\checkmark$

## Lemaître introduit la pression

le modèle De Sitter ignore la matière ! mais montre que les vitesses de récession des nébuleuses spirales sont la conséquences du champ gravitationnel

le modèle Einstein admet la matière et démontre une relation entre la densité de matière et le facteur d'échelle. Mais n'explique pas la vitesse de récession des nébuleuses spirales.

le modèle Lemaître montre que  $R$  est fonction du temps et que  $R(t)$  augmente indéfiniment en fonction du temps  
il suppose la conservation de l'énergie et inclut la pression de radiation et le terme de densité de matière  
Lemaître souligne l'importance de la pression au début de l'Univers  
Gamov reprendra l'idée

le modèle de Lemaître :

Univers de courbure positive en expansion monotone,  
à densité et à pression non nulles

s'approche asymptotiquement du modèle Einstein en remontant le temps

appearance the spectrum is very much like spectra of the Milky Way clouds in Sagittarius and Cygnus, and is also similar to spectra of binary stars of the *W Ursae Majoris* type, where the widening and depth of the lines are affected by the rapid rotation of the stars involved.

The wide shallow absorption lines observed in the spectrum of N. G. C. 7619 have been noticed in the spectra of other extra-galactic nebulae, and may be due to a dispersion in velocity and a blending of the spectral types of the many stars which presumably exist in the central parts of these nebulae. The lack of depth in the absorption lines seems to be more pronounced among the smaller and fainter nebulae, and in N. G. C. 7619 the absorption is very weak.

It is hoped that velocities of more of these interesting objects will soon be available.

#### 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

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a *K* term of several hundred kilometers which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a re-examination of the question, based on only those nebular distances which are believed to be fairly reliable.

Distances of extra-galactic nebulae depend ultimately upon the application of absolute-luminosity criteria to involved stars whose types can be recognized. These include, among others, Cepheid variables, novae, and blue stars involved in emission nebulae. Numerical values depend upon the zero point of the period-luminosity relation among Cepheids, the other criteria merely check the order of the distances. This method is restricted to the few nebulae which are well resolved by existing instruments. A study of these nebulae, together with those in which any stars at all can be recognized, indicates the probability of an approximately uniform upper limit to the absolute luminosity of stars, in the late-type spirals and irregular nebulae at least, of the order of  $M$  (photographic) =  $-6.3$ . The apparent luminosities of the brightest stars in such nebulae are thus criteria which, although rough and to be applied with caution,

original de la publication par Hubble  
de la relation  
distance et vitesse de récession  
17 janvier 1929  
46 vitesses radiales dont 4 négatives  
(M31, M32, NGC205 et M33)

Proceeding of the  
National Academy of Sciences  
Vol. 15 p.168

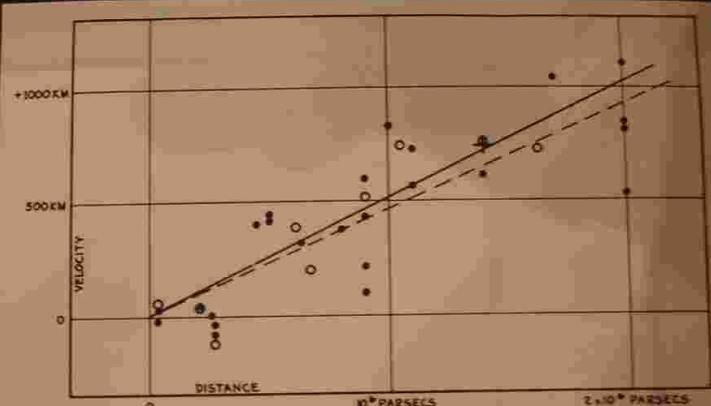
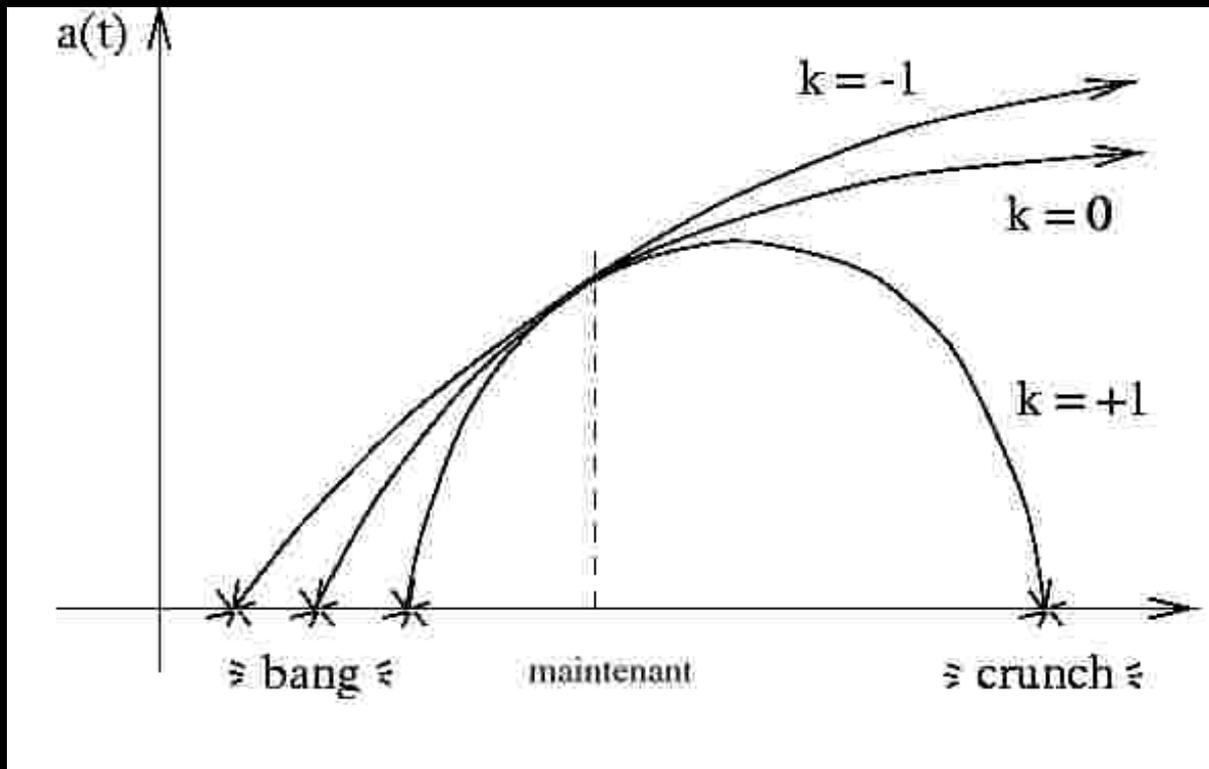


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

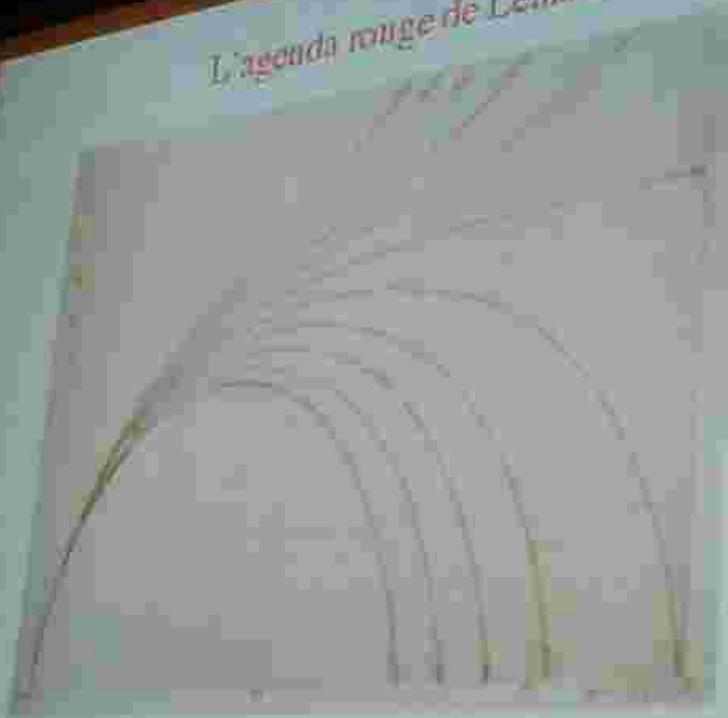


Lemaître a donc montré pour la première fois que :

« les vitesses de récessions des nébuleuses extragalactiques sont la conséquence de l'expansion de l'Univers dans le cadre de la Relativité Générale »

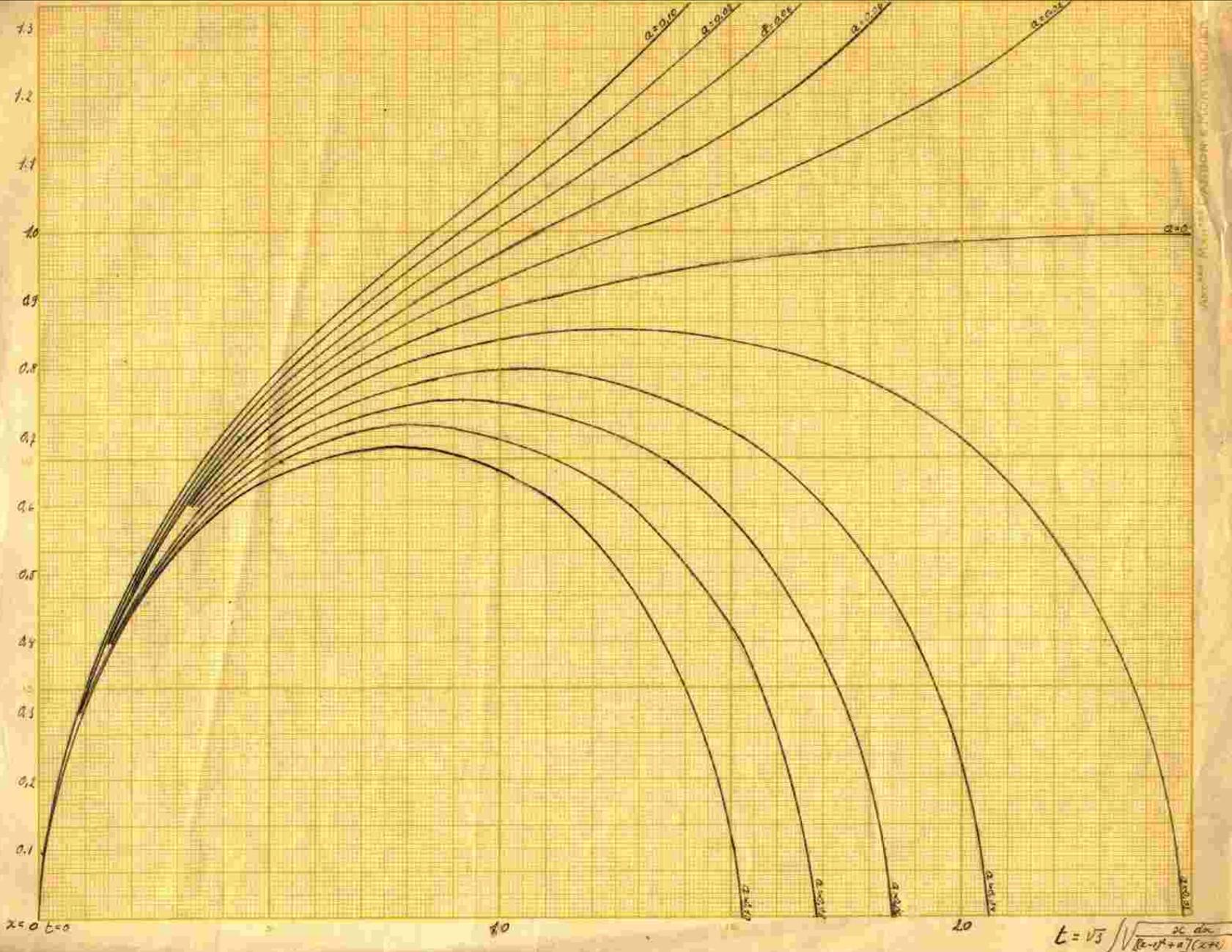
JP Luminet

L'agenda rouge de Lemaître (1927)



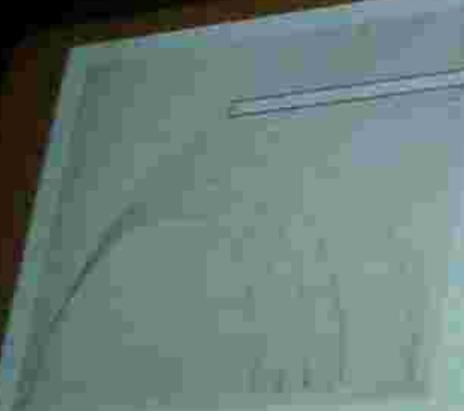
$k=+1$   
topologie  
elliptique

évolution temporelle du facteur d'échelle  
en fonction de la constante cosmologique  
( espace de courbure positive)  
les mesures actuelles donnent la courbe du haut

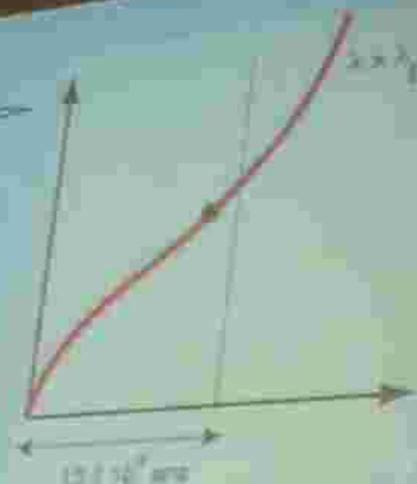


American Mathematical Carbon & Mounting

$$t = \sqrt{3} \sqrt{\frac{2c \, dx}{(R - \sqrt{1 + a})(C + x)}}$$



$k = -1$ , topologie elliptique  
(Lemaître, 1927)



Modèle de Lemaître-Poincaré (Luminet et al., 2003)

Courbure :  $k = +1$  (espace sphérique)

Topologie : Espace dodécaédrique de Poincaré

Matière-énergie :  $\Omega_m = 0.28$ ;  $\Omega_\Lambda = 0.73$

Dynamique : expansion perpétuelle accélérée

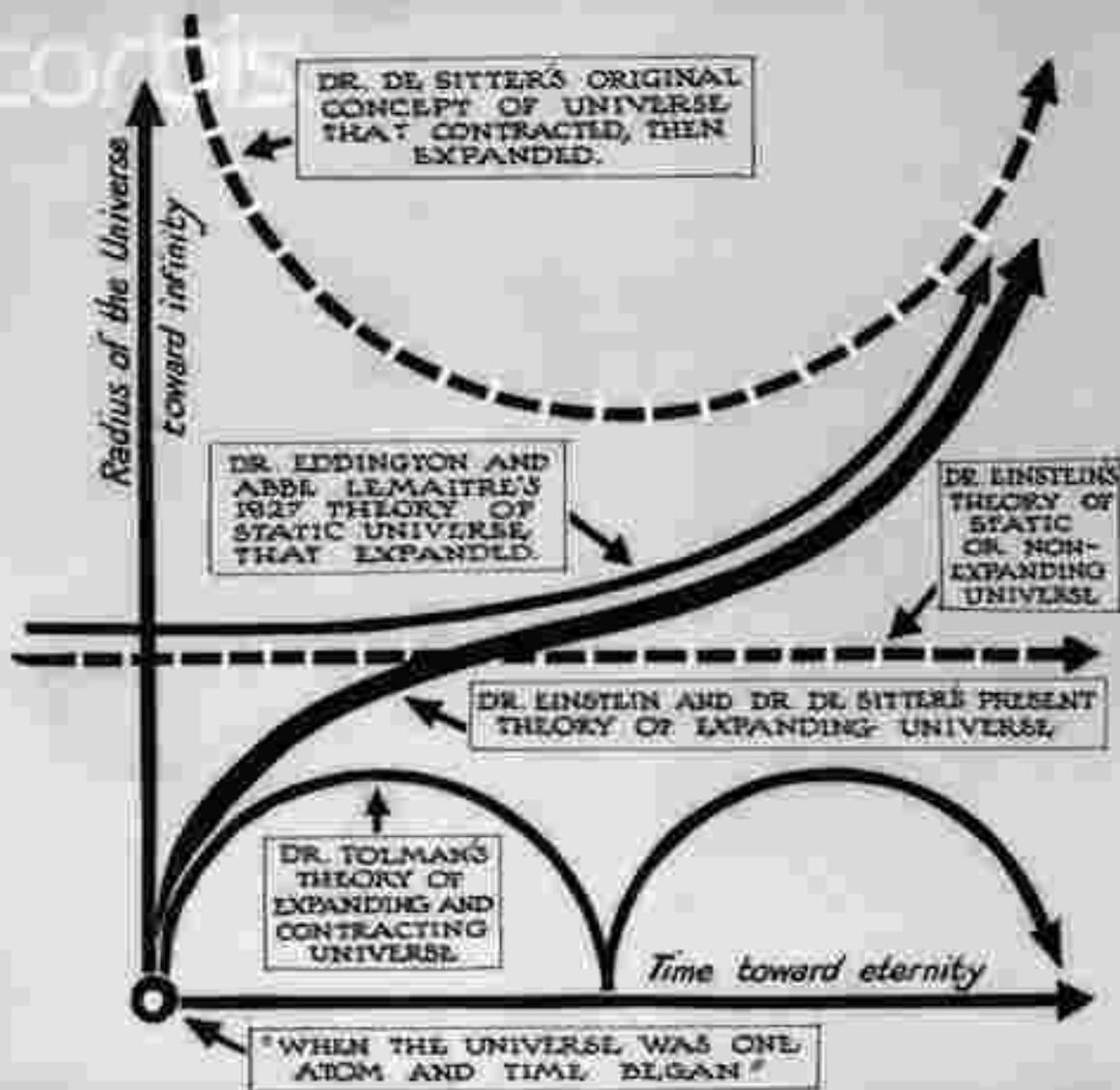


Concordance  
model

$\Omega_m$

- Espace  $\pi$  plat  $\rightarrow$  infini (monocannexe) ( $k = 0$ )
- Densité d'énergie :  $\Omega_{m_0} = 1,00$  ( $\Omega_m = 4/30$ ;  $\Omega_\Lambda = 0,72$ )
- Expansion accélérée

COPY



## Lemaître (1927 vs.1931)

Therefore

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

is the apparent Doppler effect due to the variation of the radius of the universe. *It equals the ratio of the radii of the universe at the instants of observation and emission, diminished by unity.*

$v$  is that velocity of the observer which would produce the same effect. When the light source is near enough, we have the approximate formula:

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

where  $r$  is the distance of the source. We have therefore

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr} \quad \dots \quad (23)$$

From a discussion of available data, we adopt

$$\frac{R'}{R} = 0.68 \times 10^{-27} \text{ cm.}^{-1} \quad \dots \quad (24)$$

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

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

Text translated  
by Eddington

original ...

En 1931, son ancien maître Eddington publie une traduction anglaise de l'article de 1927 ainsi qu'un long commentaire. Lemaître fut alors invité à Londres afin de participer à une réunion de la British Association sur la relation entre l'univers physique et la vie de l'esprit. C'est là qu'il propose un début singulier de l'univers en expansion et lance l'idée de l'"Atome Primitif" qu'il précise dans un mémoire publié dans les Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Cette proposition provoqua une réaction très vive de la communauté scientifique de l'époque. Eddington qualifia cette hypothèse de rébarbative.

# Titre des 21 conférences

Théorie des radiations et Quanta (1911)

La structure de la matière (1913)

Atomes et électrons (1921)

Conductivité électrique des métaux et problèmes reliés (1924)

**Electrons et photons (1927)**

Magnétisme (1930)

Structure et propriétés du noyau (1933)

Particules élémentaires (1948)

L'état solide (1951)

Electrons dans les métaux (1954)

**Structure et évolution de l'Univers (1958)**

Théorie quantique des champs (1961)

**Structure et évolution des galaxies (1964)**

Problèmes fondamentaux Physique des particules (1968)

Symétries des noyaux (1970)

**Astrophysique et gravitation (1973)**

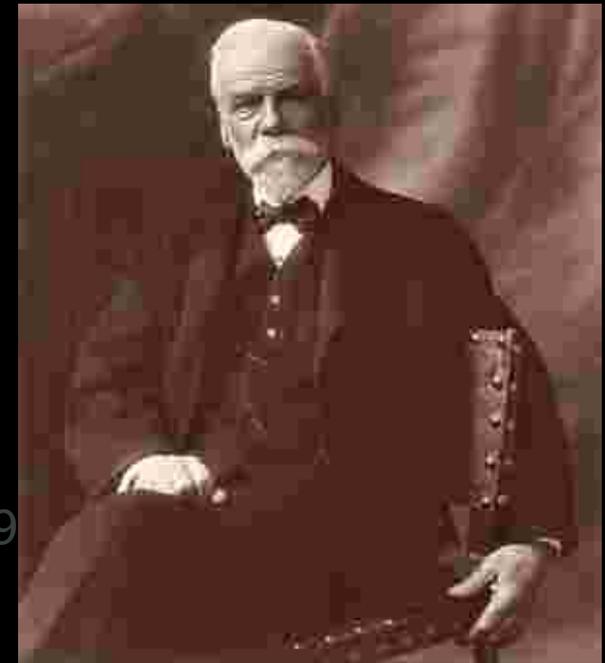
Ordre et fluctuations méca. quantique en équilibre (1978)

**Physique des hautes énergies (1982)**

Sciences des surfaces (1987)

Optique quantique (1991)

Description probabiliste des méca. Quantique et classique (1998)



Ernest Solvay a découvert un nouveau procédé pour la production industrielle de la soude au moyen du sel de mer, de l'ammoniac et de l'acide carbonique.



Einstein et Bohr



Dirac et Heisenberg

dans les rues de Bruxelles:  
les savants de  
la physique quantique  
des années 30



unique sommet des physiciens

naissance de la physique quantique

adoption du principe d'incertitude d'Heisenberg

Einstein a perdu



5 ième congrès Solvay à Bruxelles 24-29 octobre 1927  
première rencontre Lemaître-Einstein avec Piccard

A. PICCARD	E. HEURIEUX	P. EHRENFEST	E. HERZÉN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHEBELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H. FOWLER	L. BRILLOUIN
F. DEBYE	M. EISENBERG	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P. AM. DIRAC	A.H. COMPTON	L. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR		
K. LANGEVIN	M. PLANCK	M. CURIE	H.A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	C.É. GUYÉ	C.É. WILSON	O.W. RICHARDSON		



pendant le Congrès Solvay de 1927

Lemaître parle d'expansion de l'Univers avec Einstein qui lui apprend les travaux de Freidmann

Einstein ignore les résultats de Hubble  
Lemaître lui dit que :

l'expansion du rayon  $R$  de l'Univers varie avec le temps fonction  $R(t)$

c'est un processus sous l'action de 2 forces antagonistes:  
gravitationnelle ( avec potentiel en  $1/R$ )  
et répulsive ( potentiel en  $1/R^2$ )

Einstein reste sur son Univers statique

1929 Hubble publie

« a Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae  
avec les travaux de Slipher sur les vitesses et ceux d'Humason sur les redshift



## Hubble, père du big bang??

• « *The realm of nebulae* (1936) : « l'auteur du présent ouvrage est  
au premier chef un observateur ».

• Sur 202 pages, l'interprétation théorique des observations occupe la  
page 198.

• Friedmann, Robertson, et Milne (cosmologie newtonienne) sont  
cités, pas Lemaître.

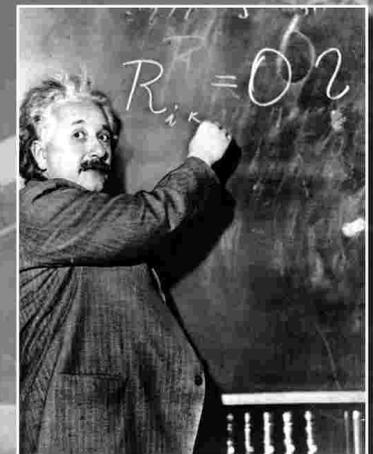
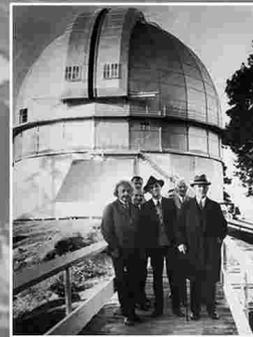
• Hubble considère le décalage spectral comme un pur effet Doppler  
(du à une vitesse de fuite propre des galaxies) et non pas comme un  
effet de l'expansion.

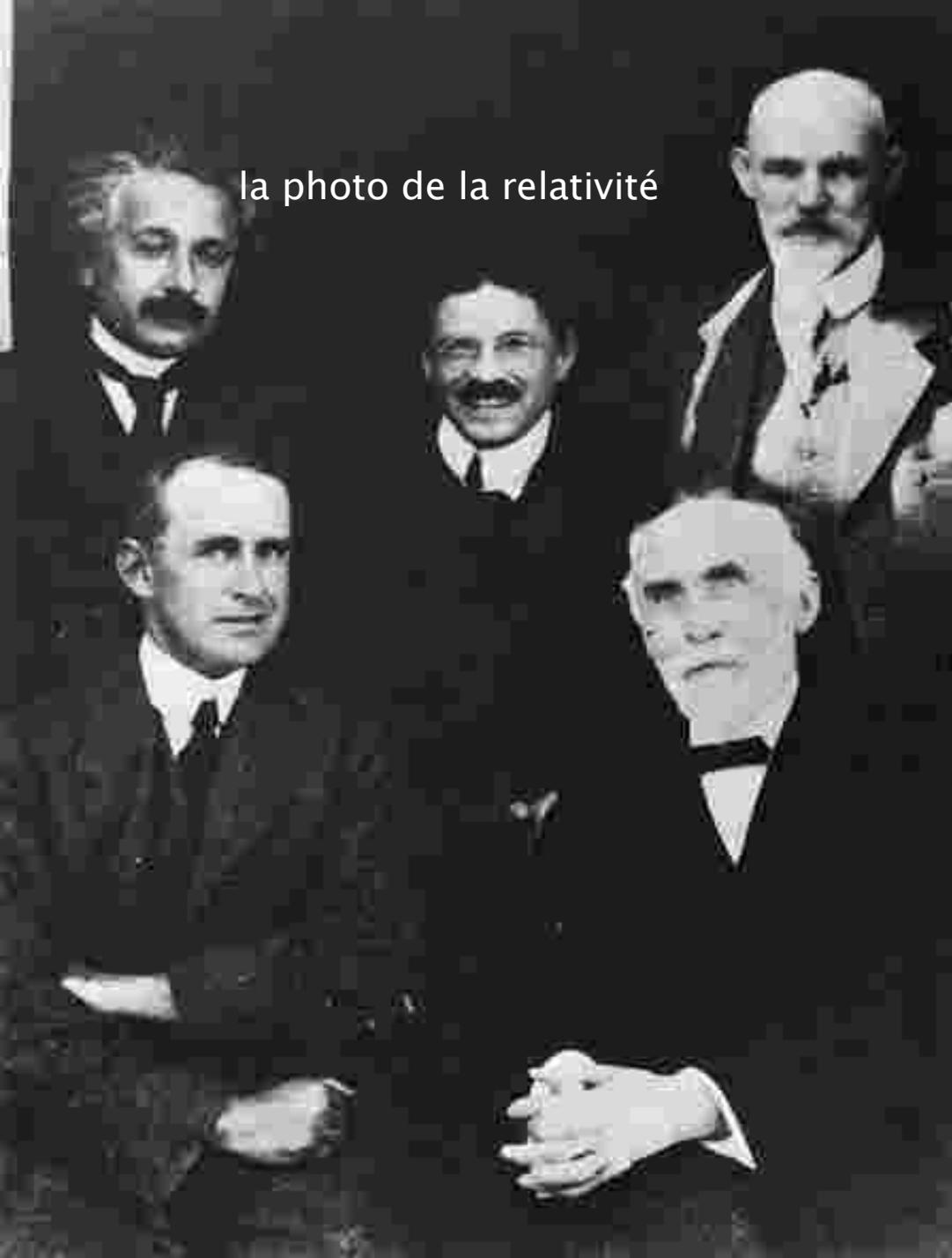
Hubble n'a pas admis l'expansion de l'Univers  
alors qu'on lui en prête la découverte!  
pour lui, le redshift vient d'un effet Doppler

# 1930 Einstein admet l'expansion de l'Univers

Eddington démontre l'instabilité de l'Univers statique d'Einstein  
une petite perturbation de matière implique  
une variation du « rayon » avec le temps

Einstein reconnaît son erreur et publie un article:  
« Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie »  
il supprime sa constante cosmologique  
il cite Hubble, Fridman ... **mais pas Lemaître**



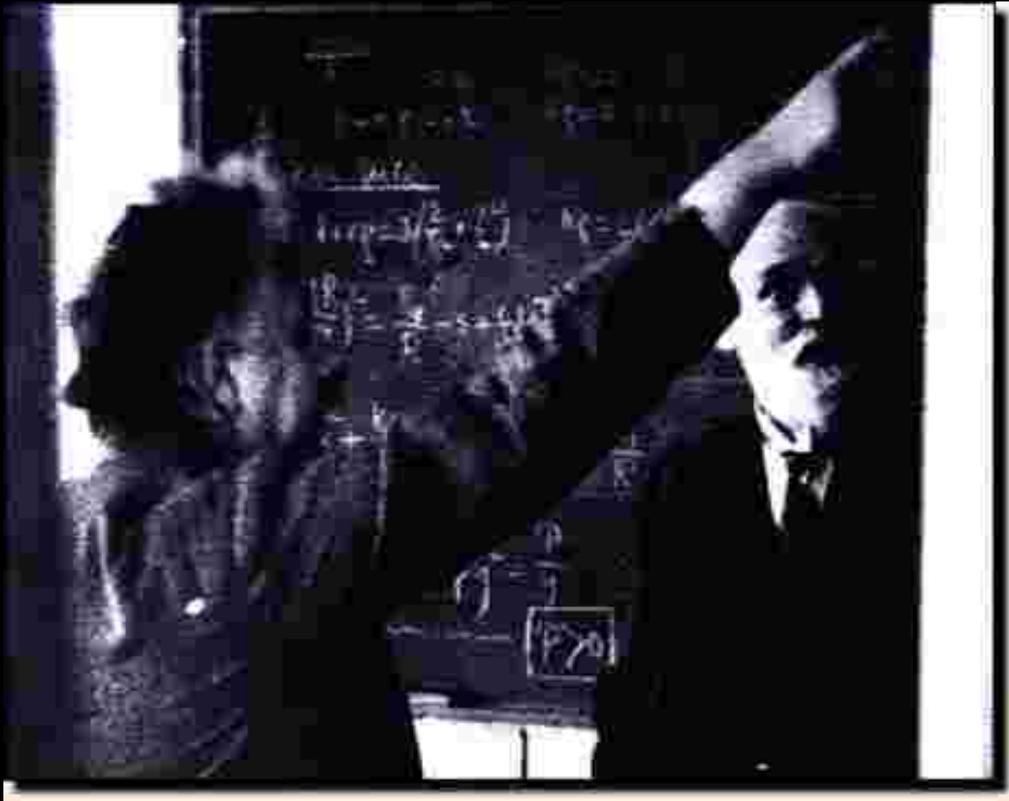


la photo de la relativité

10/01/1930 de Sitter **doute de l'Univers statique d'Einstein** en désaccord avec les données observationnelles

Eddington et Mc Vittie cherchent des **modèles dynamiques** ( avec Robertson qui publie en 1929 une métrique générale )  
Lemaître est averti de la démarche **en lisant la revue Observatory**

**Lemaître envoie des copies de son article de 1927 en disant que le problème est résolu par lui depuis 1927 !**  
**Eddington envoie un double à de Sitter ( Peebles retrouve la lettre!)**



1930 de Sitter publie  
« The Expanding Universe,  
Discussion of  
Lemaître's Solution  
of the Equations of the  
Inertial Field »  
dans

Bulletin of the Astronomical  
Institute of the Netherlands

Proceedings of the national  
Academy of Sciences

Publications of the Astronomical  
Society of the Pacific

« to call attention of astronomers to this paper »

Eddington publie l'article de Lemaître « traduit » dans les  
Monthly Notices of the Royal Society

Lemaître est célèbre !

# loi de Hubble? loi de Lemaître? loi de Lemaître-Hubble?

translate into english:

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg <sup>(1)</sup>, 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 <sup>(2)</sup>.

Nous adopterons donc

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

Cette relation nous permet de calculer R. Nous avons

by:

« from a discussion of available data, we adopt  $R'/R = 0.68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$  (Eq.24) »

une omission de traduction ?...

To a minority of cosmologists who had read the French original of Lemaître's 1927 paper, it was known that **a few paragraphs were deleted in the translation**, notably the one in which Lemaître assessed **the evidence for linearity of the distance–velocity** relation and estimated the expansion rate.

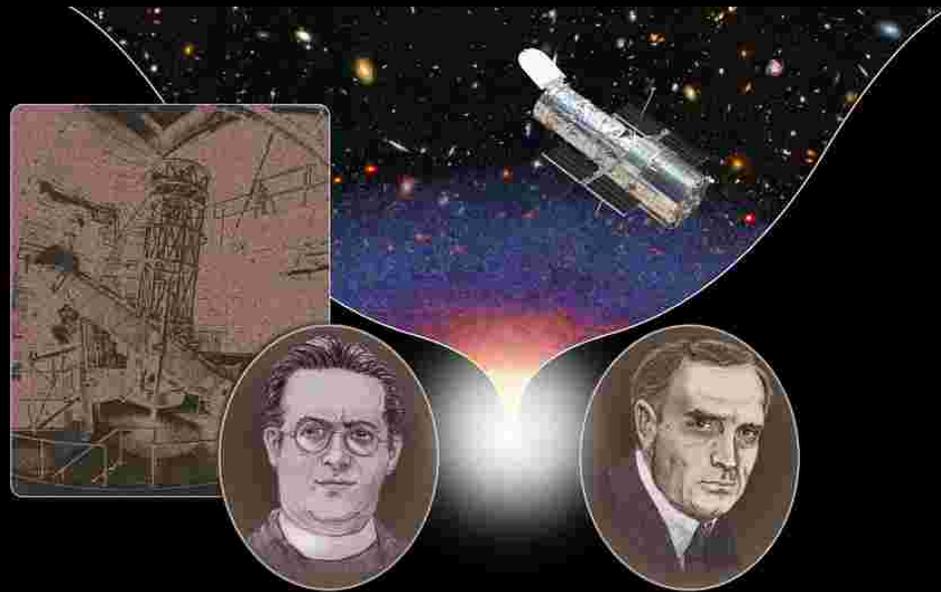
Fortunately, the origin of this curious fact has very recently been completely cleared up. **It was Lemaître himself who translated his original paper.**

The correspondence of him with the editor of MNRAS, quoted in [16], shows that Lemaître was not very interested in establishing priority. He saw no point in repeating in 1931 his findings four years earlier, since the quality of the observational data had in the meantime been improved.

This is one of the reasons that Hubble was elevated to the discoverer of the expanding universe.

Livio, Nature **479**, 208–211 (2011).

$$v = hD \text{ qui?}$$



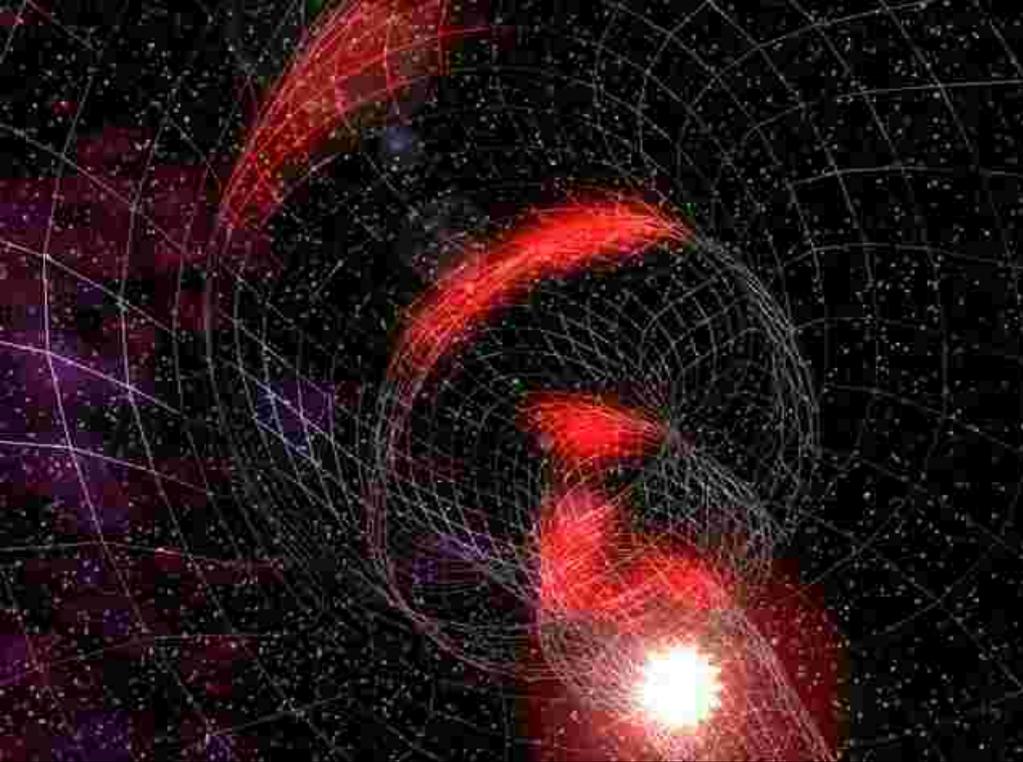
- « Il est prouvé que Lemaître a prédit ce que Hubble a patiemment redécouvert empiriquement
- « la fameuse loi devrait pour le moins porter les deux noms
- « Hubble, auquel est systématiquement attribuée la paternité de l'expansion de l'Univers, n'a admis qu'avec beaucoup de réticence que la récession des galaxies puisse résulter de l'expansion de l'espace!

Jean-Pierre Luminet « l'invention du big bang »



3

l'atome primitif



Lemaître dépasse ...le maître

nouvelle problématique de Lemaître:  
cause du  
**déclenchement de l'Expansion**

Lemaître cherche l'instabilité de l'Univers statique d'Einstein.

une perturbation de cet Univers le conduit à se modifier au cours du temps

ce que réfute Einstein

Eddington cherche dans les formation de condensations ( fluctuations de densité)

GL montre que le rayon de l'Univers d'Einstein varie en fonction de la variation de pression qui s'exerce sur la surface de séparation entre des régions voisines. Cette pression est l'énergie cinétique des particules échangées dans ces régions

c'est le phénomène de stagnation que Lemaître étudia dans sa thèse ( formation de condensations à symétrie sphérique

# LEMAÎTRE contre EDDINGTON !

Eddington publie ( 5/01/1931 ) :

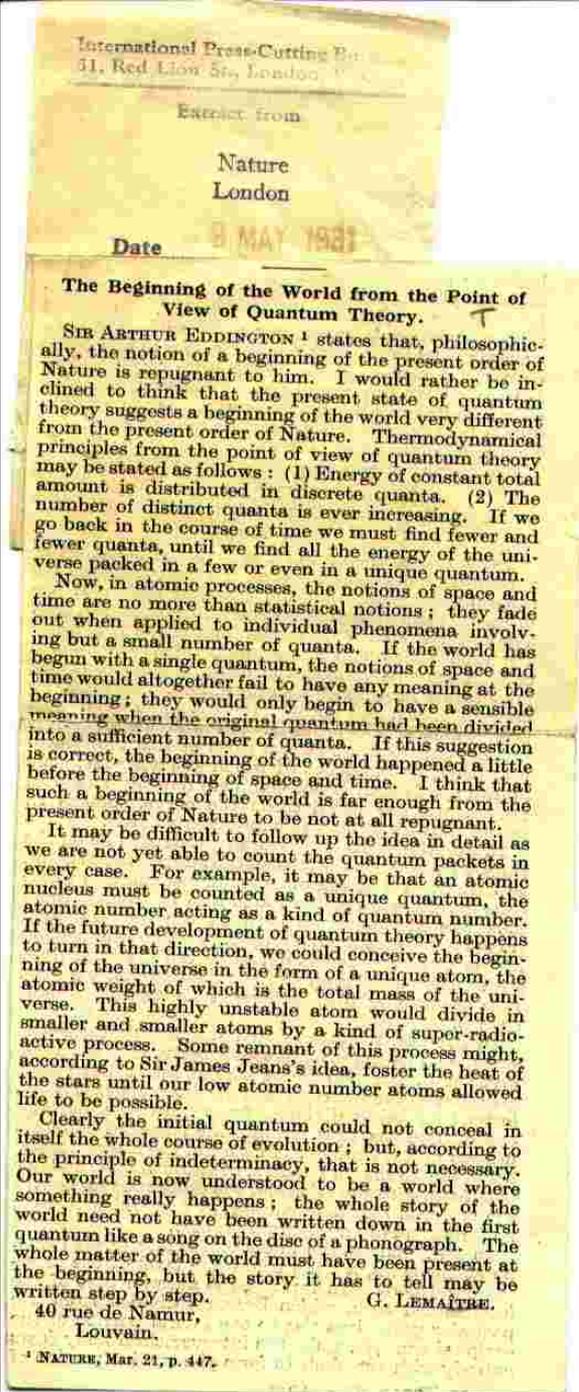
« Philosophically, the motion of a beginning of the present of nature « is repugnant for me »

la rupture de la stabilité de l'Univers statique d'Einstein devient essentiel pour la compréhension de la formation des premières galaxies et de expansion de l'Univers

Lemaître répond dans Nature 9/05/1931

« The beginning of the World  
« from the point of View of  
« Quantum Theory »

ce texte est l'un des articles les plus remarquables de toute l'histoire des sciences ( JP Luminet )



International Press-Cutting Co.  
31, Red Lion St., London

Extract from

Nature  
London

Date 5 MAY 1931

## The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory.

SIR ARTHUR EDDINGTON<sup>1</sup> states that, philosophically, the notion of a beginning of the present order of Nature is repugnant to him. I would rather be inclined to think that the present state of quantum theory suggests a beginning of the world very different from the present order of Nature. Thermodynamical principles from the point of view of quantum theory may be stated as follows: (1) Energy of constant total amount is distributed in discrete quanta. (2) The number of distinct quanta is ever increasing. If we go back in the course of time we must find fewer and fewer quanta, until we find all the energy of the universe packed in a few or even in a unique quantum.

Now, in atomic processes, the notions of space and time are no more than statistical notions; they fade out when applied to individual phenomena involving but a small number of quanta. If the world has begun with a single quantum, the notions of space and time would altogether fail to have any meaning at the beginning; they would only begin to have a sensible meaning when the original quantum had been divided into a sufficient number of quanta. If this suggestion is correct, the beginning of the world happened a little before the beginning of space and time. I think that such a beginning of the world is far enough from the present order of Nature to be not at all repugnant.

It may be difficult to follow up the idea in detail as we are not yet able to count the quantum packets in every case. For example, it may be that an atomic nucleus must be counted as a unique quantum, the atomic number acting as a kind of quantum number. If the future development of quantum theory happens to turn in that direction, we could conceive the beginning of the universe in the form of a unique atom, the atomic weight of which is the total mass of the universe. This highly unstable atom would divide in smaller and smaller atoms by a kind of super-radioactive process. Some remnant of this process might, according to Sir James Jeans's idea, foster the heat of the stars until our low atomic number atoms allowed life to be possible.

Clearly the initial quantum could not conceal in itself the whole course of evolution; but, according to the principle of indeterminacy, that is not necessary. Our world is now understood to be a world where something really happens; the whole story of the world need not have been written down in the first quantum like a song on the disc of a phonograph. The whole matter of the world must have been present at the beginning, but the story it has to tell may be written step by step.

G. LEMAÎTRE.

40 rue de Namur,  
Louvain.

<sup>1</sup> NATURE, Mar. 21, p. 447.

# « the evolution of the universe

contributions to a British association discussion on the evolution of the universe «

communications de J. Jeans, G. Lemaître, W. de Sitter, A. Eddington, R. A. Millikan, J. C. Smuts, E. W. Barnes et O. Lodge le 29/09/1931  
British Association for the advancement of Science  
Centenary meeting. London. Issue Supplement Nature 24 October 1931

Lemaître said:

« At the origin, all mass of the universe would exist in the form of

## a unique atom

The radius of the universe, although not strictly zero, being relatively small.  
The whole universe would be produced by the the desintegration of this

## primeval atom



# la fonction facteur d'échelle $R(t)$

en  $R(0)$  n'est pas dérivable

autrement dit temps, pression, courbure sont infinis  
la notion d'avant n'a donc pas de sens.

la théorie "dit" que **pour elle il n'y a pas d'avant.**

Il est alors naturel de choisir cette singularité (ou quelque chose de représentable qui s'en "rapproche" le plus) comme

**origine du temps**

Ce qui s'en "rapproche" le plus est actuellement appelé le "temps de Planck" ( $10^{-43}$  s dans la chronologie purement relativité générale), "temps" en deçà duquel des conflits de causalité semblent s'imposer

pour  $R = 0$  l'espace-temps n'est donc pas défini  
selon la théorie dite du big bang  
le big bang n'existe pas  
Lemaître n'a jamais prononcé le mot

- (2) Equations of the universe of variable radius and constant mass have been fully discussed, without reference to the receding velocity of nebulae, by  
 A. FRIEDMANN, "Über die Krümmung des Raumes," *Z. f. Phys.*, 10, 377, 1922; see also  
 A. EINSTEIN, *Z. f. Phys.*, 11, 326, 1922, and 18, 228, 1923.  
 The universe of variable radius has been independently studied by  
 R. C. TOLMAN, *P.N.A.S.*, 16, 320, 1930.
- (3) Discussion of the theory, and recent developments are found in  
 A. S. EDDINGTON, *M.N.*, 90, 668, 1930.  
 W. DE SITTER, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 16, 474, 1930, and *B.A.N.*, 5, No. 185, 193, and 200 (1930).  
 G. LEMAITRE, *B.A.N.*, 5, No. 200, 1930.
- (4) Popular expositions have been given by  
 G. LEMAITRE, "La grandeur de l'espace," *Revue des questions scientifiques*, March 1929.  
 W. DE SITTER, "The Expanding Universe," *Scientia*, Jan. 1931.

*The Expanding Universe.* By Abbé G. Lemaitre.

(Communicated by Sir A. S. Eddington.)

1. Introduction.

Eddington has suggested that the expansion of a universe in equilibrium may be started by the formation of condensations. A preliminary investigation by W. H. McCrea and G. C. McVittie seems to point out an effect of opposite sense according to the nature of the condensations.\* I find that the formation of condensations and the degree of concentration of these condensations have no effect whatever on the equilibrium of the universe. Nevertheless, the expansion of the universe is due to an effect very closely related to the formation of condensations, which may be named the "stagnation" of the universe. When there is no condensation, the energy, or at least a notable part of it, may be able to wander freely through the universe. When condensations are formed this free kinetic energy has a chance to be captured by the condensations and then to remain bound to them. That is what I mean by a "stagnation" of the world—a diminution of the exchanges of energy between distant parts of it.

In order to investigate the effect of condensations in a universe homogeneous in the mean, I consider a definite condensation of supposed spherical symmetry, and I average the outside condensations so that they also may be thought of as having spherical symmetry. The condensation under investigation is limited by a spherical shell which is the neutral zone between it and neighbouring condensations; a point on this neutral zone is not more within the gravitational influence of the interior condensation than of the condensations outside. The expansion of the neutral zone gives a measure of the expansion of the

\* Sir A. S. Eddington, *M.N.*, 90, 668, 1930; W. H. McCrea and G. C. McVittie, *M.N.*, 91, 128, 1930; G. C. McVittie, *M.N.*, 91, 274, 1931.

whole universe. I find by this method exactly the same equations as were deduced directly from the equations of a homogeneous universe of variable radius. The result does not depend on any variation in the degree of concentration of the matter, and it shows that the pressure  $p$  of the homogeneous universe must be thought of in the case of condensations as the radial kinetic energy, the density of exchanges of energy between the condensation and the outside regions.

In order to study the effect of a variation of  $p$  it is convenient to choose as an auxiliary variable the gravitational potential  $M/R$ , where  $M$  is the total proper mass. Then equations may be reduced to quadratures, and any law of variation can be easily discussed. Variations of  $p$  in a universe in equilibrium are found to induce variations of  $R$  of the opposite sense.

In order to obtain quantitative formulæ for the expansion of a universe in equilibrium due to the stagnation process, I worked out the special case where the stagnation arose in an instant. The value of the actual radius of the universe depends on the observed receding velocity and mean density by formulæ practically independent of the degree of the initial stagnation. The epoch of the rupture of equilibrium is found for the capture of a millionth of the mass of the universe having velocity of 30 km./sec. to be of the order of  $10^{11}$  years.

2. Non-static Field of Spherical Symmetry: Birkhoff's Theorem.

The problem of the condensations in a universe of variable radius can be considered as a problem of a non-static field with spherical symmetry. We shall therefore obtain the general equations of a spherical non-static field, and extend to the case where there is a cosmological constant a very important theorem due to Birkhoff; viz.—Schwarzschild's exterior solution is the general solution in empty space even if the field is not static.\* Of course, this theorem makes abstraction of immaterial changes of co-ordinates; it supposes only that the spherical symmetry is conserved and that the exterior field remains empty. This is the relativistic transposition of Newton's theorem that the exterior field of a spherical body does not depend on its condensation or expansion; or, otherwise stated, that spherical pulsations do not induce gravitational waves.

Spherical symmetry is characterised by an interval

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + g_{22}(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) + 2g_{14}dx_1dx_4 + g_{44}dx_4^2$$

where  $g_{11}$ ,  $g_{22}$ ,  $g_{14}$ , and  $g_{44}$  are functions of  $x_1$  and  $x_4$  only. This expression is invariant for the group of transformations which keeps  $d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$  invariant and which represents the rotations of a sphere on itself.

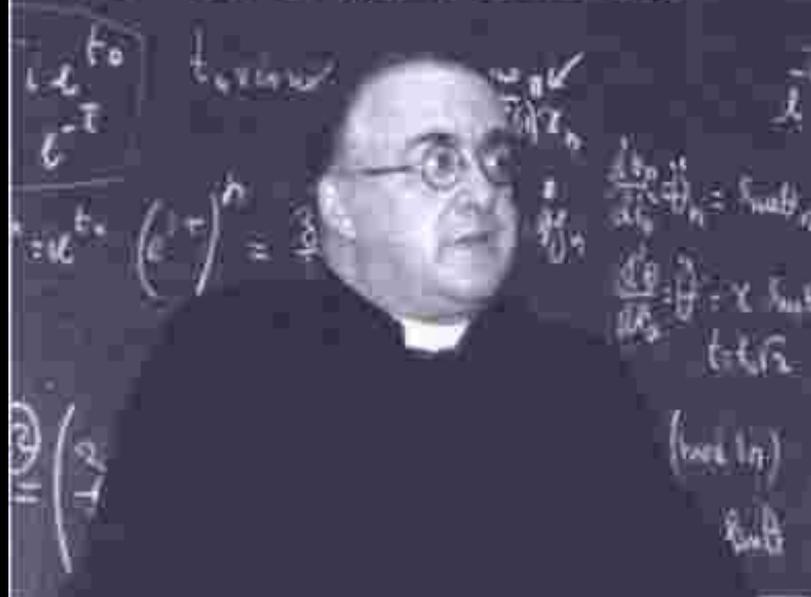
We introduce standard co-ordinates  $r$ ,  $T$ ; first  $r$  in place of  $x_1$  by

$$r^2 = -g_{22}$$

\* G. D. Birkhoff, *Relativity and Modern Physics*, p. 253 (1923).

Dominique Lambert

# UN ATOME D'UNIVERS



*La vie et l'œuvre  
de Georges Lemaître*

Les Éditions **Racine**

LES PROBLÈMES DE LA PHILOSOPHIE DES SCIENCES

L'HYPOTHÈSE  
DE L'ATOME PRIMITIF

ESSAI DE COSMOGONIE

PAR

GEORGES LEMAÎTRE

PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE LIÉGÈRE

PRÉFACE DE FERDINAND CONNETH

PROFESSEUR À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE



NEUCHÂTEL  
ÉDITIONS DU GRIFFON

BRUXELLES  
ÉDITIONS HERMÈS

# L'Univers en expansion

PAR

M. l'abbé G. LEMAITRE

## INTRODUCTION ET RÉSUMÉ

Nous ne nous proposons pas dans ce travail de discuter les hypothèses sur lesquelles se fonde la théorie de l'expansion de l'Univers, ni la valeur des confirmations astronomiques qui l'étayent. Une telle discussion nous paraît actuellement prématurée et ne pourrait certes pas arriver à des conclusions définitives dans l'état actuel de la théorie et des observations.

La théorie peut être développée de deux façons : par l'étude de solutions exactes des équations de la gravitation, fournissant des modèles simplifiés, ou par le développement approché de la solution de problèmes plus complexes. Il nous paraît utile de ne pas mélanger ces deux méthodes, et dans ce travail nous ne nous occuperons que de solutions mathématiquement exactes. Lorsque nous voudrons les appliquer aux problèmes réels, nous aurons à faire appel à l'intuition physique pour réduire un problème trop complexe à un modèle simplifié, dont nous avons la solution. Plusieurs de nos résultats semblent pouvoir servir de points de départ à des méthodes de développement en série que nous espérons traiter dans un travail ultérieur.

Dans les deux premiers paragraphes, nous donnons en détail les calculs de tenseurs, dont nous aurons besoin, et que nous résumons au § 3, en introduisant des notations qui mettent en évidence l'analogie des résultats relativistes avec les formules classiques.

Nous introduisons ensuite la notion de champ quasi-statique qui permet de généraliser immédiatement des solutions statiques connues en y permettant des variations adiabatiques. Nous donnons une solution probablement nouvelle pour le cas d'une sphère à pression radiale constante, et nous en servons pour mettre en évidence le paradoxe de Schwarzschild et montrer que la limitation plus sévère du rayon d'une masse donnée introduite par la solution du problème intérieur s'évanouit lorsqu'on

n'impose pas à la matière la condition d'être à l'état fluide. Nous décrivons une mise en charge de l'univers d'Einstein, supposé fluide où la masse propre de l'univers diminue sans que le volume varie, ni l'équilibre soit troublé.

Au § 6, nous résumons en les complétant des résultats obtenus dans notre thèse de doctorat (non publiée) présentée en 1927 au Massachusetts Institute of Technology et relatifs à une modification proposée par Eddington au problème intérieur de Schwarzschild.

Le § 7 est relatif à l'influence de la formation de condensations locales sur la rupture de l'équilibre d'un univers d'Einstein : nous retrouvons notre résultat (M. N. 91-1931-490) que la pression à la zone neutre est le facteur déterminant de la rupture d'équilibre en éliminant les complications techniques qui encombraient notre démonstration primitive.

Au § 8, nous étudions le développement de condensations sphériques dans l'univers en expansion, dans l'hypothèse où la pression est négligeable et retrouvons comme cas particulier l'univers de Friedmann.

Nous intégrons ensuite, § 9, l'équation de Friedmann par les fonctions elliptiques de Weierstrass et mettons les équations sous une forme adaptée aux calculs numériques.

Au § 10, nous introduisons l'hypothèse que les amas de nébuleuses sont en équilibre. Cette hypothèse peut être vérifiée par l'observation, et le résultat est favorable. On obtient comme masse moyenne des nébuleuses  $7 \times 10^5$  fois la masse du soleil et comme coefficient d'expansion de l'univers 13.

Nous indiquons comment cette nouvelle hypothèse pourrait donner une signification cosmique à la fréquence relative des amas et des nébuleuses isolées et lever ainsi l'indétermination qui subsiste dans la loi de l'expansion. Nous calculons ensuite dans diverses hypothèses, la durée de l'expansion et le rayon de l'univers.

L'hypothèse de l'équilibre des nébuleuses semble exclure le cas critique pour lequel le rayon d'équilibre dépasserait de beaucoup le milliard d'années de lumière. Nous établissons le résultat que dans ce cas critique la distance à l'instant d'équilibre des points les plus éloignés qui peuvent échanger de la lumière au cours de l'expansion est encore de quelques milliards d'années de lumière.

Au § 11, nous écartons une contradiction apparente entre la théorie de Friedmann et la solution du problème extérieur de Schwarzschild. D'après cette dernière, une masse telle que celle de l'univers ne pourrait avoir un rayon inférieur à un milliard d'années de lumière. Nous montrons que la singularité du problème extérieur de Schwarzschild est une singularité apparente due au fait que l'on a imposé une solution statique et qu'elle peut être éliminée par un changement de coordonnées.

$$(1.9) \beta_{ik} = \frac{1}{a_i a_k} \left[ \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{a_k} \frac{\partial a_i}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{a_i} \frac{\partial a_k}{\partial x_i} \right) + \sum_l \frac{\partial a_i}{\partial x_l} \frac{\partial a_k}{\partial x_l} \right]$$

la somme en  $l$  s'entendant pour les valeurs différentes de  $i$  et de  $k$ .

Le scalaire totalement contracté  $R$  s'obtiendra en faisant aussi la somme en  $i$ . Il contiendra deux fois chacun des  $\beta_{ik}$  et nous pourrons écrire

$$(1.10) \quad \frac{1}{2} R = \sum_{i < k} \beta_{ik}$$

Les équations de la gravitation (1.1) s'écrivent donc pour  $\mu = \nu = i$

$$(1.11) \quad \kappa T_i^i + \lambda = \sum_{k < l} \beta_{kl}$$

où la sommation s'entend sans répétition ( $k < l$ ) et pour les valeurs de  $k$  et  $l$  différentes de  $i$ , soit explicitement,

$$(1.12) \quad \left\{ \begin{array}{l} \kappa T_1^1 + \lambda = \beta_{23} + \beta_{24} + \beta_{34} \\ \kappa T_2^2 + \lambda = \beta_{13} + \beta_{14} + \beta_{34} \\ \kappa T_3^3 + \lambda = \beta_{12} + \beta_{14} + \beta_{24} \\ \kappa T_4^4 + \lambda = \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{23} \end{array} \right.$$

Il nous reste à calculer les composantes  $R_{ik}$  pour  $i \neq k$ . Employant la même méthode, nous obtenons

$$\begin{aligned} \frac{R_{ik}}{a_i a_k} = & \frac{1}{a_i a_k} \left[ -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{a_i} \frac{\partial a_i}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{a_k} \frac{\partial a_k}{\partial x_i} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{a_i} \frac{\partial a_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{a_k} \frac{\partial a_k}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{1}{a_l} \frac{\partial a_l}{\partial x_i} \right) \right] \\ & - \alpha_{ik} \alpha_{ii} - \alpha_{ik} \alpha_{ki} - \alpha_{ik} \alpha_{li} \\ & - \alpha_{ki} \alpha_{kk} - \alpha_{ki} \alpha_{ik} - \alpha_{ki} \alpha_{lk} \\ & + \alpha_{ii} \alpha_{ik} + \alpha_{kk} \alpha_{ki} + 2\alpha_{ik} \alpha_{ki} + \alpha_{li} \alpha_{lk} \end{aligned}$$

soit, en effectuant les dérivations et substituant par (1.4) et (1.5),

$$\frac{R_{ik}}{a_i a_k} = \alpha_{lk} - \alpha_{li} \alpha_{ik} - \alpha_{lk} \alpha_{ki}$$

ou par (1.1)

$$(1.13) \quad -\kappa T_{ik} = \sum_l \frac{1}{a_l} \left[ \frac{\partial^2 a_l}{\partial x_i \partial x_k} - \frac{1}{a_i} \frac{\partial a_l}{\partial x_i} \frac{\partial a_i}{\partial x_k} - \frac{1}{a_k} \frac{\partial a_l}{\partial x_k} \frac{\partial a_k}{\partial x_i} \right],$$

la sommation en  $l$  étant entendue pour les valeurs différentes de  $i$  et de  $k$ .

augmenter le rayon, mais en même temps on augmente l'énergie contenue dans la matière

$$\rho = \delta + 3p;$$

L'effet gravifique de cette énergie finit par compenser l'effet de la pression et les deux influences l'emportent tour à tour.

En d'autres termes, dans l'hypothèse d'Eddington, il n'est plus question de variations adiabatiques, on ne peut augmenter la pression sans apporter de l'extérieur de l'énergie et l'effet gravifique de cette énergie supplémentaire finit par l'emporter.

Pour certaines valeurs du rayon, il existe plusieurs configurations d'équilibre; il est clair que, sauf celle d'énergie minimum, ces configurations sont instables.

## 7. INSTABILITÉ DE L'UNIVERS D'EINSTEIN.

Après avoir étudié les champs sphériques quasi-statiques, nous nous proposons d'examiner comment peut se produire la rupture d'équilibre d'un champ quasi-statique et en particulier la rupture d'équilibre de l'univers d'Einstein.

Nous imaginons que par un processus que nous tâcherons de conserver aussi général que possible, on modifie soit l'équation d'état de la matière, soit sa répartition. Nous supposons qu'au moment de la rupture d'équilibre on a encore

$$(7.1) \quad \frac{\partial r}{\partial t} = 0$$

et par conséquent

$$(7.2) \quad \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

comme pour les champs quasi-statiques; mais ces relations ne sont plus maintenant des identités. Nous reportant à l'équation (3.7) de l'accélération et tenant compte des relations (7.1), (7.2), nous voyons que la rupture de l'équilibre ne peut provenir que d'une modification de  $p$  ou de  $\frac{\partial c}{\partial x}$ .

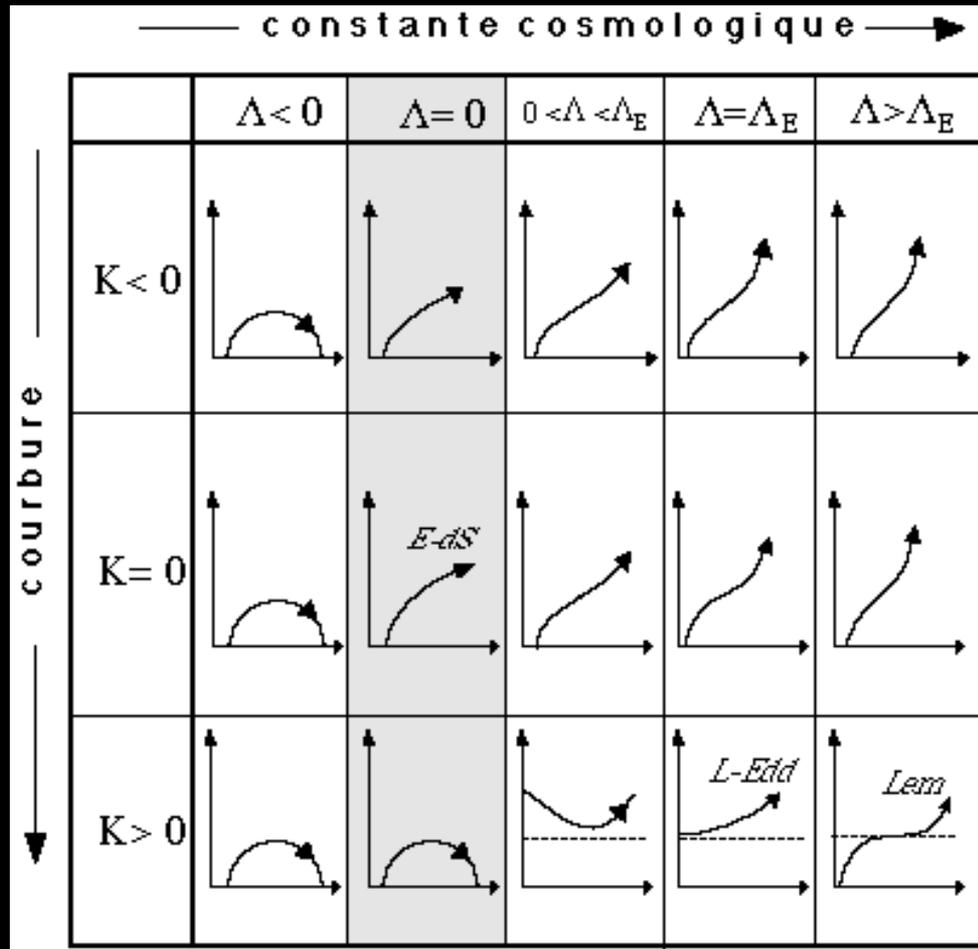
Nous avons vu plus haut des exemples de telles modifications, mais alors ces modifications étaient ajustées de manière à ne pas troubler l'équilibre.

Il est clair que si  $p$  et  $\frac{\partial c}{\partial x}$  ne varient pas, il est impossible de rompre

l'équilibre, et cela même si  $p$  et  $\frac{\partial c}{\partial x}$  varient autre part qu'au point considéré.

Si on met en mouvement une région intérieure par exemple, bien entendu en conservant la symétrie sphérique, cela n'aura aucune influence sur la région extérieure, pourvu que la pression et la force de gravitation  $\frac{\partial c}{\partial x}$  n'y soient pas modifiées.

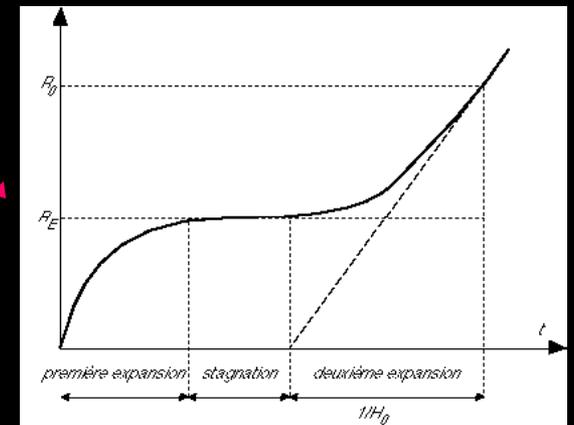
# dynamique des modèles cosmologiques de Fridman-Lemaître ( = variation du facteur d'échelle en fonction du temps )



fonction de la courbure  $K$   
et de

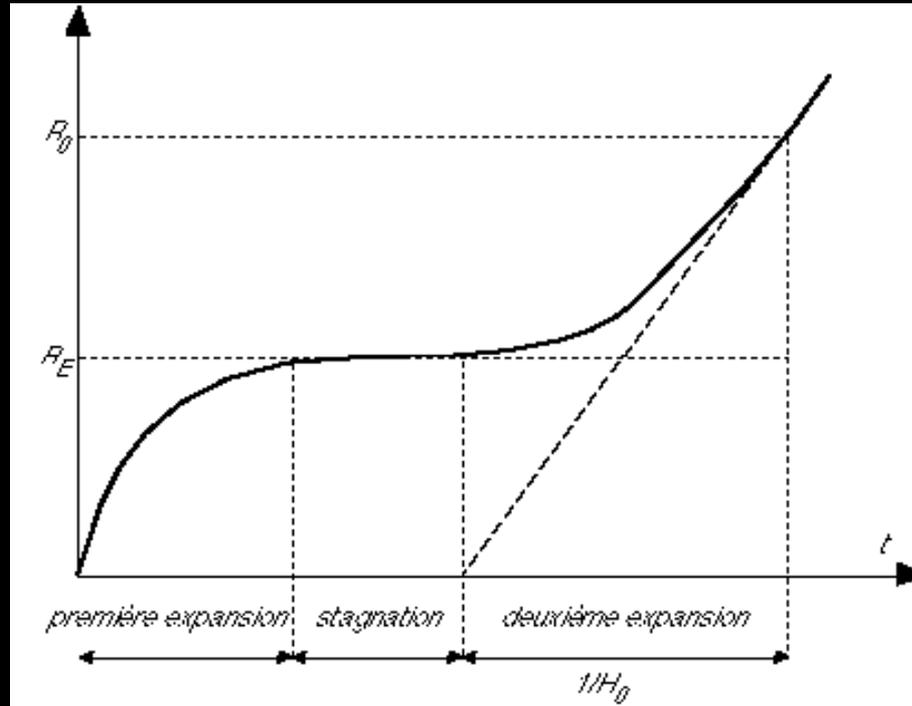
valeur de  $\Lambda$  calculée par Einstein  
en 1917 pour un univers statique

positive = action répulsive  
= expansion perpétuelle



$R_E = (1 / \sigma_{th}^2) = 4M /$   
Univers hésitant de Lemaître  
rayon initial d'équilibre  $R_e$   
Rayon d'Einstein  $M$  masse de l'U

## formation des galaxies par condensation à RE



$$R_E = (1 / \sigma_{th}^3) = 4M /$$

Univers hésitant de Lemaître

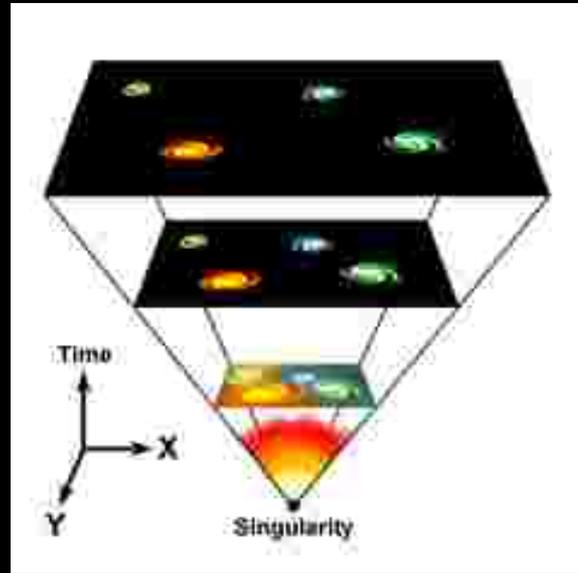
rayon initial d'équilibre  $R_e$ , limite de l'Univers statique d'Einstein

rayon d'Einstein, M masse de l'U

après la phase de stagnation enclenchement de la période d'expansion selon la « loi d'Hubble »

la tangente  $\sigma_E = 1/R_E^2 = 2GM / c^2 R_E^3$

Lemaître et Eddington supposent que le temps est lié à la croissance de l'entropie



pour avoir un espace-temps il faut un tenseur d'énergie matérielle  
la matière dans un état non décomposé donne une singularité dans le tenseur de droite  
donc aussi une singularité dans le tenseur de gauche ( courbure ) (  $R(t) = 0$  )  
donc il n'y a pas d'espace-temps avant ( ou plutôt préalablement )  
la condensation de l'entropie

le monde physique actuel vient d' « un truc coïncidant avec  $R(t) = 0$  »

## la singularité initiale crée l'espace-temps

singularité = dénominateur des dérivées égale 0 donc les grandeurs deviennent infinies

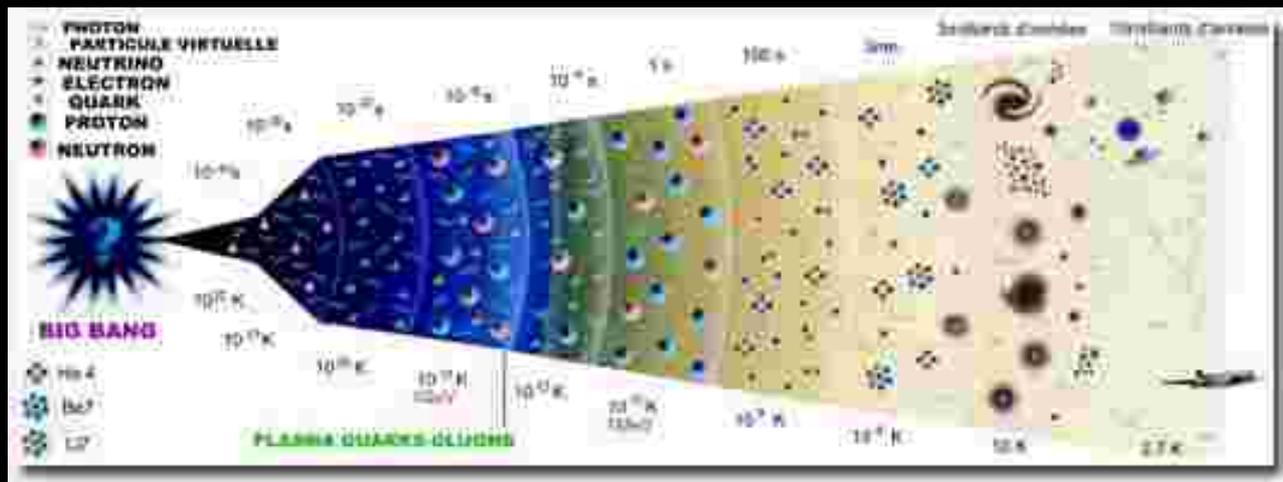
l'idée géniale de Lemaître consiste donc à lier l'infiniment grand à l'infiniment petit  
Cf les problèmes de frontières d'aujourd'hui ( ère de Planck ... )

# Lemaître ne parle JAMAIS de « création du monde »

il parle de début de la diversité du monde physique actuel due à une singularité :  
l'entropie est devenue non nulle créant l'espace-temps

cette singularité découle uniquement de  
l'application aux limites des équations RG du champ gravitationnel  
et de rien d'autre

de même, il ne prononça jamais le mot « big bang », terme péjoratif destiné  
à le ridiculiser



temps  
(dédit de la

température)

# History of the Universe

Accelerators: CERN-LHC  
 FNAL-Tevatron  
 BNL-RHC  
 CERN-LEP  
 SLAC-SLC

high-energy cosmic rays

Inflation

BIG BANG

t	$10^{-44}$	$10^{-37}$ s
T	$10^{32}$	$10^{28}$
E	$10^{19}$	$10^{15}$

possible dark matter relics

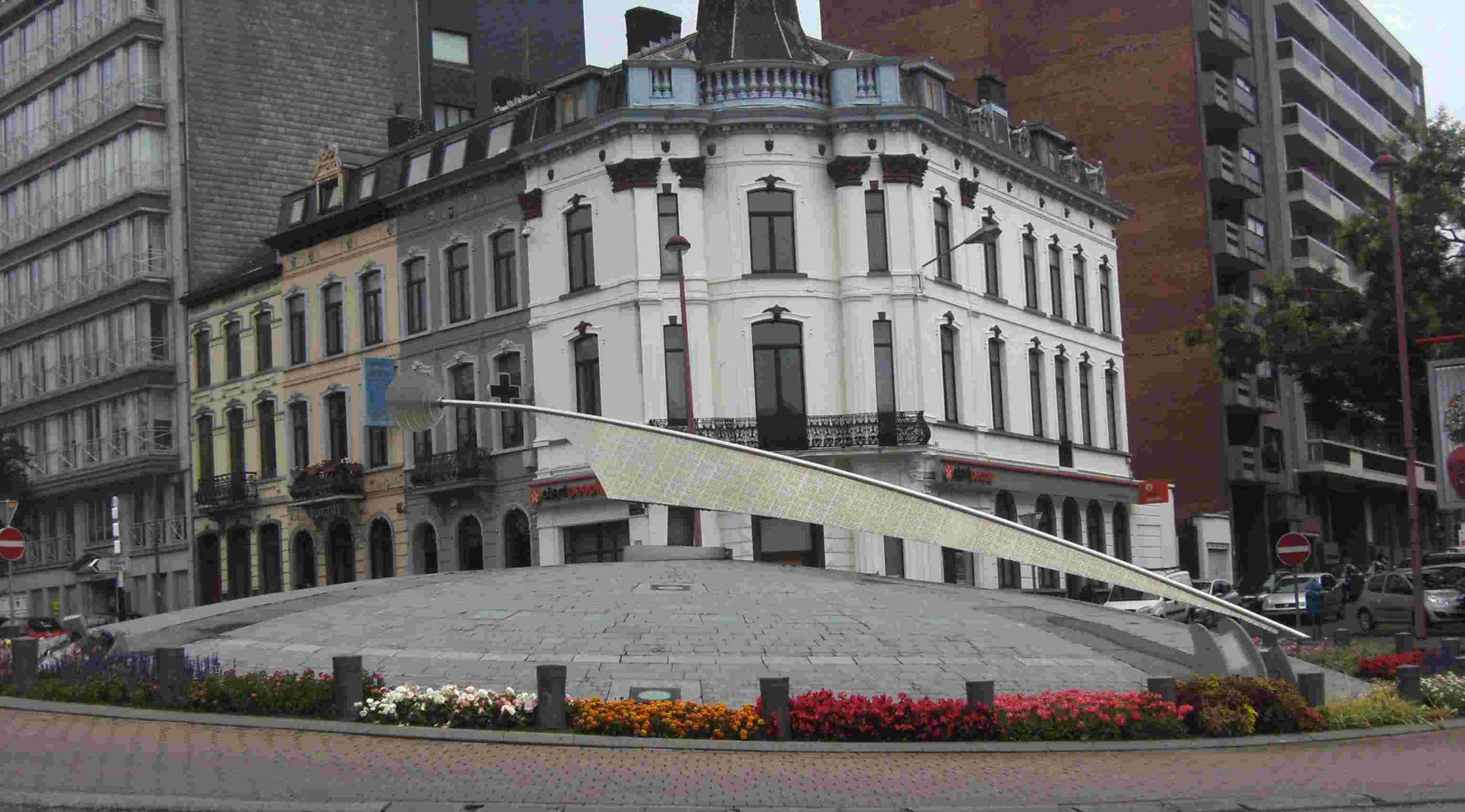
cosmic microwave radiation visible

**Key:**

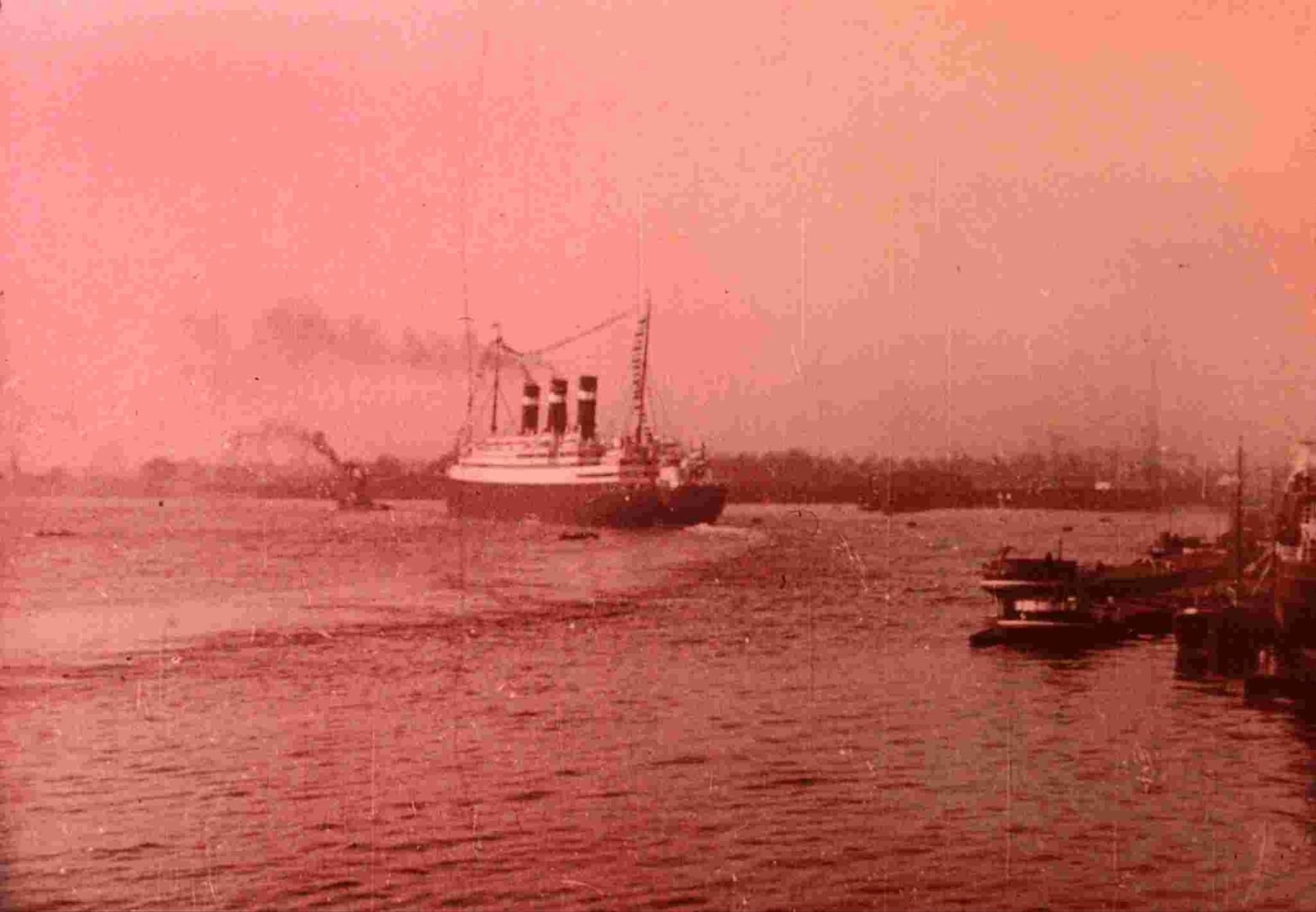
W, Z bosons		photon	
quark		meson	
gluon		baryon	
electron		ion	
muon		atom	
tau		star	
neutrino		galaxy	
		black hole	

$10^{-10}$ s	$10^{-5}$ s	$10^2$ s	$3 \times 10^5$ y	Today
$10^{-15}$ s	$10^{-12}$ s	$10^9$ s	3000	$12 \times 10^9$ y (sec.yrs)
$10^{-19}$ s	$10^{-1}$ s	$10^4$ s	$3 \times 10^{-10}$	2.7 (Kelvin)
				$2.3 \times 10^{-13}$ (GeV)





La découverte de Lemaître est gravée sur le monument qui orne le carrefour dit « îlot des sciences » à l'intersection des boulevards Devreux et Audent, des rues Willy-Ernst et du Pont-Neuf à Charleroi.



1932 LEMAÎTRE reprend le mer

# Le temps des séminaires aux USA

1932 LEMAÎTRE est membre de l'Union Astronomique Internationale  
( commission Nébuleuses et Amas Stellaires )

Août  **membre de l'équipe de Cambridge**  d'observation de l'éclipse de Soleil  
Novembre : nouvelle bourse de voyage aux USA

**au MIT Eddington**  expose lui même « l'Univers en Expansion » de Lemaître «  
 **Boston : travail sur les rayons cosmiques**  avec Vallarta

Robertson l'invite à  l'Université de Princeton  pour donner un séminaire sur la cosmologie



25–26 novembre : American Physical Society  **Chicago Conférence de Lemaître**   
« On Compton's latitude effect of cosmic radiation »

29 novembre Californie  **Pasadena Millikan**  l'invite à donner un séminaire  
destiné aux astronomes du Mont Wilson sur  **la formation des nébuleuses dans**   
 **l'Univers en Expansion**

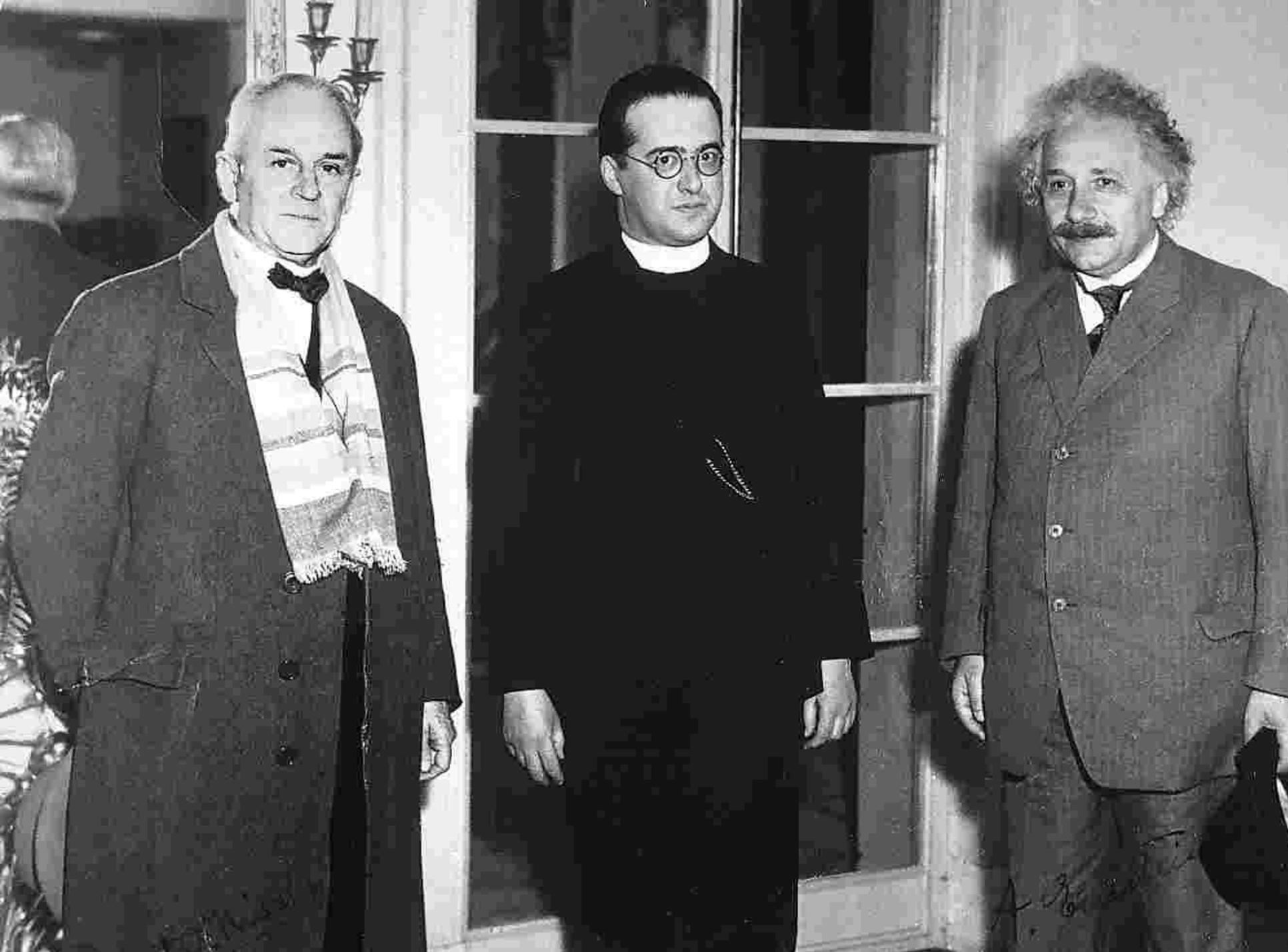


Scan ©American Institute of Physics

11 janvier 1933 Einstein se rend à Los Angeles,  
va au CALTEC assister au séminaire de Lemaître sur les rayons cosmiques  
sèche son propre séminaire de physique théorique  
pour discuter avec Lemaître sur la cosmologie

17 janvier Lemaître fait un séminaire sur la constante cosmologique  
en présence d'Einstein, Tolman, et Epstein







1 février 1933 à l'Université de Montréal  
conférence sur « la naissance de l'espace »  
2 février Université McGill  
conférence « the expanding universe »



27 mars 1933 Académie des Sciences de Paris  
Fabry présente le travail de Lemaître sur :  
« condensations sphériques  
dans l'Univers en expansion »  
10 avril « la formation des nébuleuses  
dans l'Univers en expansion

28 mars 1933

Einstein sur le bateau  
Belgenland vers Hambourg  
descend à l'escale d'Anvers et s'exile  
à De Hann sur la côte belge



3-17 mai 1933 Einstein donne à Bruxelles 3 conférences sur les spineurs

et 3 colloques dont un avec De Donder,

Einstein cède son tour à Lemaître

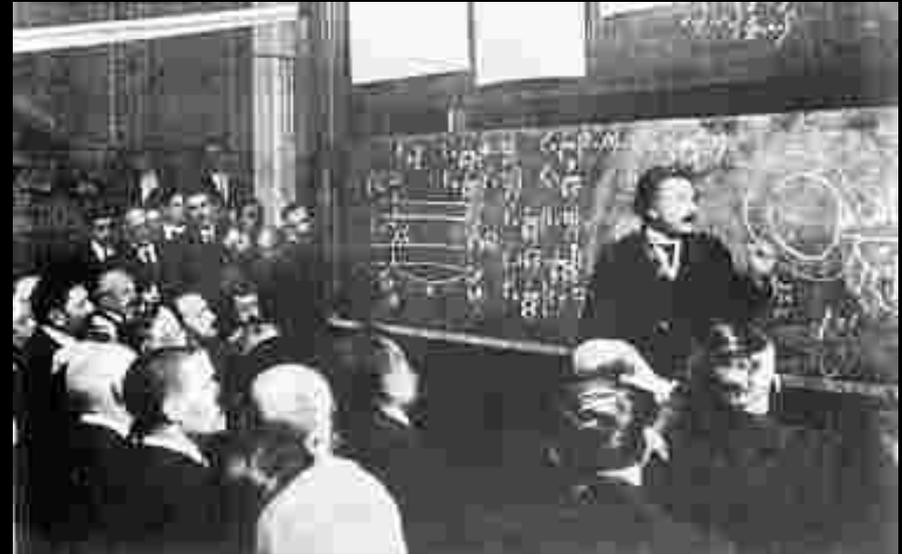
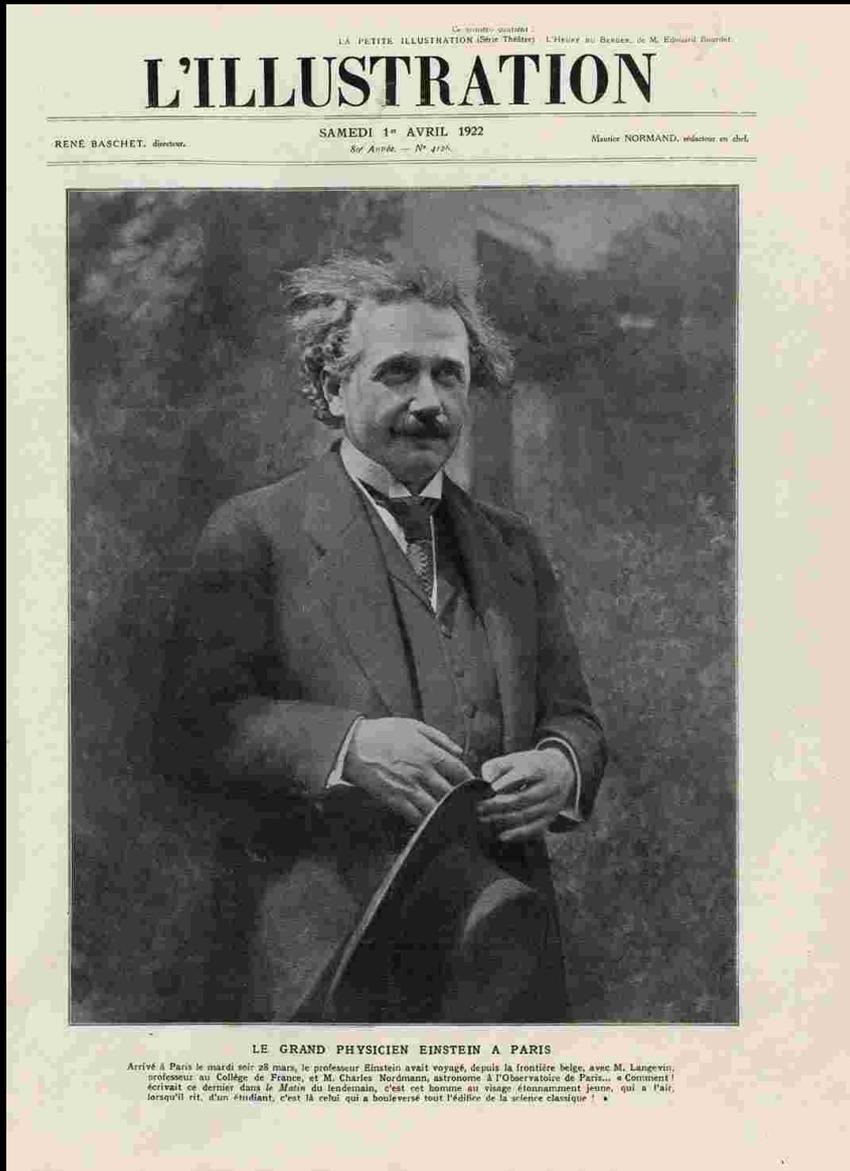
se met au premier rang et l'applaudit

plusieurs fois

Il est démarché par Flexner pour travailler à Princeton  
nouvellement crée

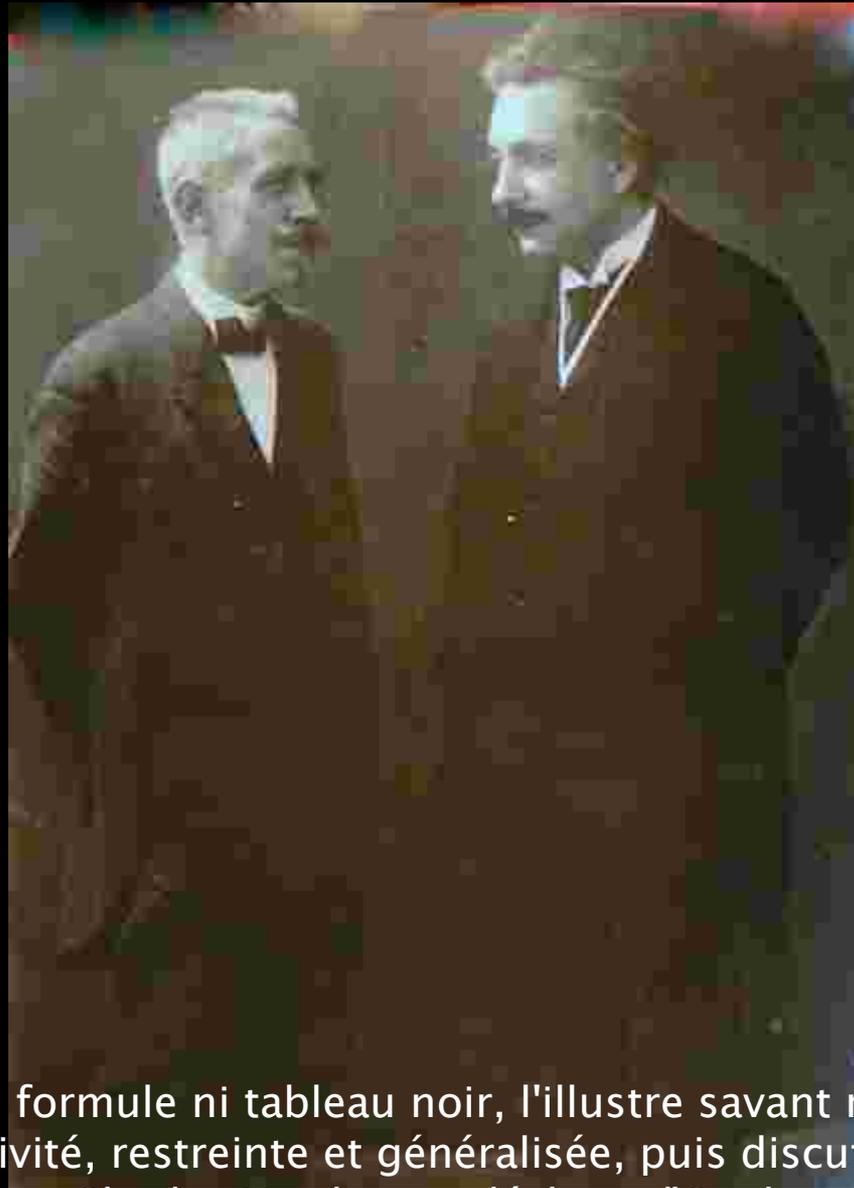


# 1922 Einstein au Collège de France invité par Langevin



à la Maison des polytechniciens





En une heure, sans formule ni tableau noir, l'illustre savant résume ses deux théories de la relativité, restreinte et généralisée, puis discute avec Monsieur Painlevé. L'astronome Charles Nordmann déclare : "Cet homme jeune, avec son rire d'étudiant, a bouleversé tout l'édifice de la science classique."

# Einstein voulait enseigner en France ...

En 1932, il fut le premier à porter le titre de *Ministre de l'Éducation nationale*. Dès sa prise de fonction, il expliqua que ce changement d'appellation devait marquer la volonté du gouvernement d'aller vers davantage d'égalité scolaire et, par suite, davantage de gratuité.

Dans cette optique, il généralisa dès 1932 la gratuité de l'enseignement secondaire destiné aux filles créé par la loi Sée de 1880.

En avril 1933, il créa le Conseil supérieur de la recherche scientifique, suite aux propositions du physicien Jean Perrin.

Il instaura, le 1<sup>er</sup> septembre 1933, l'examen d'entrée en 6<sup>e</sup>, créa le Bureau universitaire de statistiques, en liaison avec l'Union nationale des étudiants de France, la Confédération des travailleurs intellectuels et la Fédération des parents d'élèves de l'enseignement secondaire.



Anatole de Monzie



## ALBERT EINSTEIN ET LE COLLÈGE DE FRANCE : QUELQUES POINTS D'HISTOIRE

"...Ma nomination au Collège de France m'a rempli de joie et de gratitude. J'apprécie d'autant plus cette nomination qu'elle signifie l'expression d'un esprit qui, autant qu'on peut l'espérer, sauvera la culture européenne du grave péril qui la menace actuellement.

J'aurais déjà donné l'expression, et à vous-même et à la France, de ce sentiment de reconnaissance si je n'avais pas estimé de mon devoir d'attendre ma nomination officielle..."

*Extrait de la lettre d'A. Einstein à  
M. de Monzie, le 16 mai 1933  
(cf. Le Monde, 22 avril 1955)*

lettre d'Einstein  
à l'ambassadeur de France  
à Washington



d'Ostende (Le Coq-sur-Mer). De toute l'Europe, ainsi que des États-Unis, lui viennent des invitations de grandes institutions scientifiques. Le 8 avril 1933, Anatole de Monzie, Ministre de l'Éducation nationale, fait parvenir au physicien le message suivant : "Le ministre de l'Éducation nationale, au nom du gouvernement français, prie M. Einstein de lui faire savoir s'il est disposé à accepter [...] d'occuper une chaire de Physique mathématique au Collège de France, qui serait créée pour lui être attribuée en accord avec le Conseil des professeurs du Collège de France"(lettre publiée dans *Le Monde* du 22 avril 1955). La proposition de loi est déposée dans l'urgence : le ministre consulte l'administrateur du Collège, mais le temps manque pour consulter l'Assemblée des professeurs – qui donnera son aval

"...Vous savez peut-être que le gouvernement français, comme suite à une décision parlementaire, m'a donné au printemps de 1933 une chaire permanente au Collège de France. Le Consul de France à Ostende m'avait transmis cette décision dont j'ai été si honoré. Dans les conversations que j'eus avec lui à cette occasion, je l'avais rendu attentif au fait que j'avais déjà accepté de passer deux années à l'Institute for Advanced Study à Princeton, et que dans le cours de l'année scolaire je ne pouvais disposer que des seuls mois de mai et juin ...

J'avais donc projeté de partir pour Paris au milieu d'avril et d'y rester jusqu'à la fin de juin. Depuis l'été dernier, je m'en réjouissais d'une manière indescriptible. C'était pour moi une nécessité profonde de manifester d'une manière quelconque à la noble France un sentiment de cordiale sympathie et de reconnaissance. Mais mes soucis et mes nombreuses occupations de l'année dernière ont tellement éprouvé la santé de ma femme et la mienne que je ne serai pas en état pendant ces mois de mener à bien ma charge à Paris..."

d'Einstein et du Collège de France. Einstein n'a pas fui l'Europe et la France parce qu'il aurait été refusé par le Collège de France (comme l'écrivait *Le Monde* le 30 mai 1994. Cf. aussi *Le Figaro littéraire*, n° 929, 1<sup>er</sup>-7 avril 1965). Pour autant, on ne peut exclure que son choix ait pu être influencé par le climat parfois délétère qui marqua l'entre-deux-guerres, et qui n'a pas épargné



3 septembre– janvier 1934 Lemaître est « guest professor » du département physique de la Catholic University of America à Washington  
cours : « les applications astronomiques de la théorie de la Relativité »

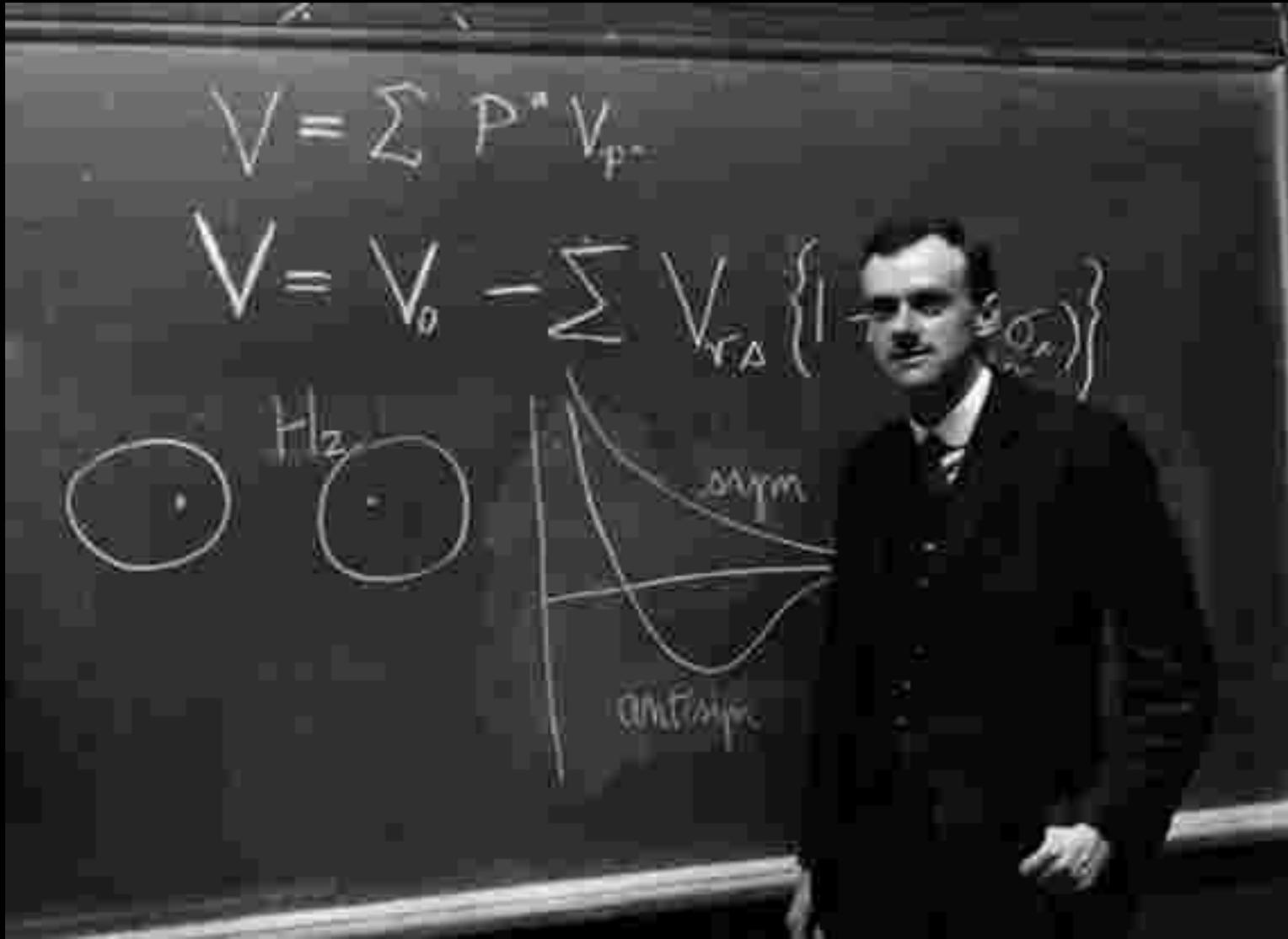
13 septembre meeting à Leicester de la British Association of Science avec Milne, Eddington, de Sitter, McCrea, McVittie sur « the Expanding Universe »  
contribution Lemaître « the cosmical significance of the clusters of nebulae »

16 novembre conférence à la Washington Academy of Sciences  
20 novembre conférence au MIT



Scanned at the American  
Institute of Physics

découverte par Dirac de l'équation décrivant l'électron relativiste  
avec la théorie des spineurs de Cartan  
Lemaître généralise l'équation d'onde en 1928 et 1955  
en travaillant avec Eddington sur la Fundamental Theory





17 mars 1934

# Prix FRANQUI

parrains:

A.Einstein  
Ch. De la Vallée Poussin  
Alexandre de Heptinne

jury:

A.S.Eddington  
Paul Langevin  
Th.De Donder  
Marcel Dehalu

janvier–juin 1935 professeur invité  
School of Mathematics de  
Institute for Advanced Study of Princeton

rencontres avec Einstein





Louvain en Belgique



un prof de math sup ...

puis de Master, de DEA, directeur de thèse  
astrophysique, géométrie elliptique, relativité, analyse numérique

Harvard 1938 International Astronomical Union

Lemaître



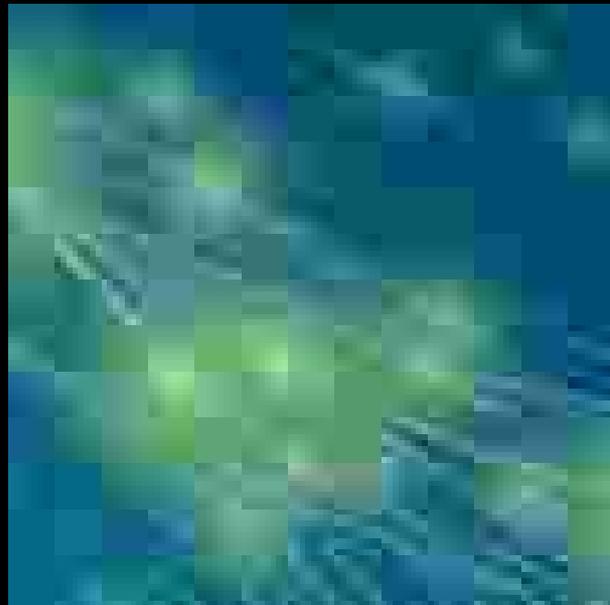
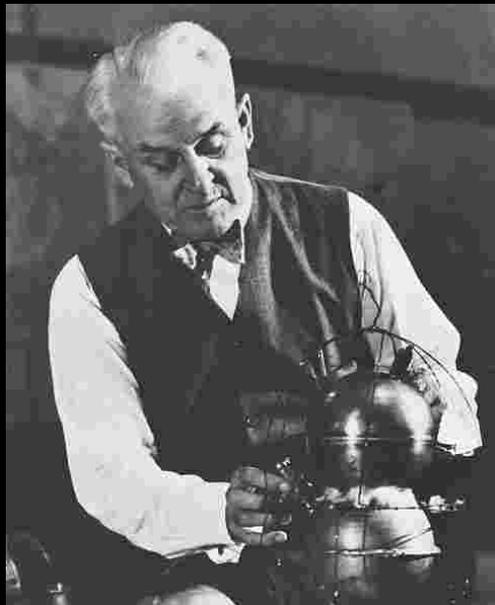


Harvard Observatory Boyden Station, Mazelspoort, South Africa, 1952. Left to right: E.M. Lindsay, J.H. Oort, G. Lemaître, J. Ramberg.

# Congrès SOLVAY 1958



# 4 à la recherche du rayonnement fossile



« *it appears quite possible that Lemaître wasn't far wrong* »

« Nature 3 september 1998

Michael HILLAS Cosmic Rays without End »

aujourd'hui l'origine des rayons cosmiques (énergie de l'ordre de  $10^{19}\text{eV}$ ) serait dans le halo galactique supposé rempli de « matière sombre » formée de particules exotiques ( voir théorie d'unification des interactions)

ces particules exotiques extrêmement massives se seraient formées au tout début de l'Univers et se seraient accumulées dans les halos et désintégrées en un temps mi-vie supérieur à celui de l'Univers actuellement connu en générant des protons très énergétiques, des photons gamma et des neutrinos  
(Berezinsky, Birkel, Sarkar)

ces particules supermassives ressemblent beaucoup aux produits de désintégration qui remplissaient l'Univers juste après la désintégration de « l'atome primitif » de Lemaître  
« il doit y avoir dans l'Univers actuel des traces hiéroglyphes de ce rayonnement fossile »



# orbites des rayons cosmiques : le problème de Störmer

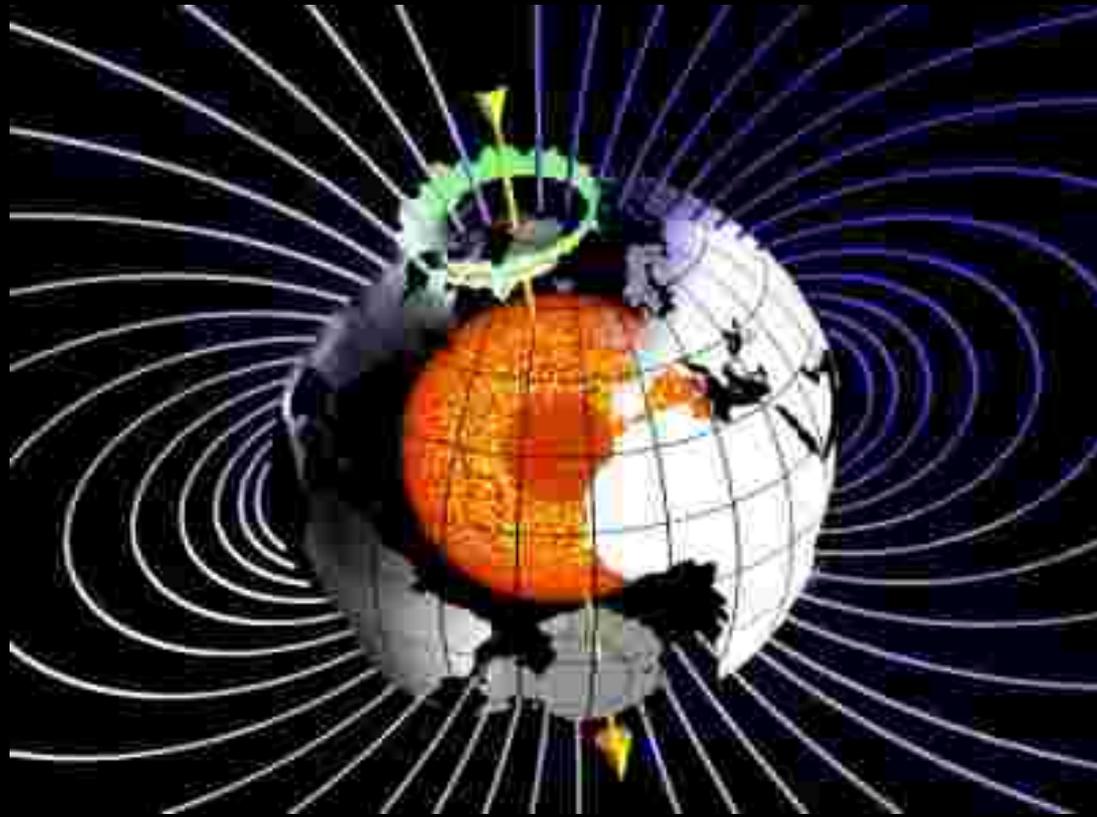
1930

Clay et Compton démontre avec une campagne impliquant 69 stations de mesure que l'intensité des rayons cosmiques varie avec les coordonnées géomagnétiques ( le dipôle magnétique Terre fait un angle  $11.5^\circ$  avec son axe de rotation )  
au voisinage de  $50^\circ$  de latitude la variation d'intensité est de 15%



au MIT Lemaître et Vallarta démontrent que la théorie de Störmer expliquant le phénomène des aurores boréales avait une relation avec la variation d'intensité des rayons cosmiques

Störmer reprenant les travaux de Birkeland sur la courbure des « rayons cathodiques » ( flux d'électrons ) par le champ magnétique terrestre au voisinage des pôles calcule les trajectoires d'électrons sous l'action d'un globe magnétique ( mono pôle )  
reste le problème avec un dipôle semblable au champ magnétique terrestre



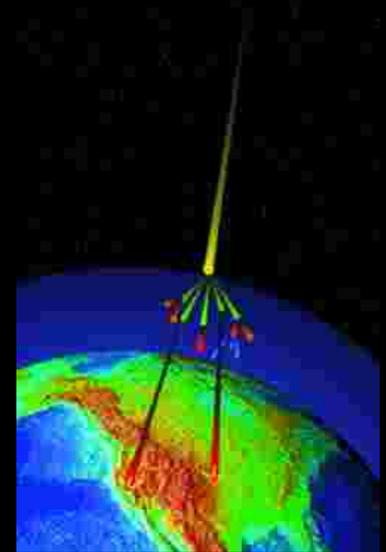
déterminer le mouvement d'une particule chargée venant de l'infini  
et sous l'influence du champ d'un dipôle magnétique

Störmer démontre que le mouvement est décrit en 2 mouvements élémentaires traités séparément

Un mouvement dans le plan méridien qui passe par l'axe du dipôle  
le point-particule est décrit par 2 équations différentielles 2ième ordre  
Le second mouvement est celui de rotation du plan méridien

entre 1904 et 1907 après 5.000 heures de calculs à la main  
Störmer et ses étudiants calculent 120 trajectoires d'électrons

Lemaître et Vallarta ( nov 1932) utilisent le Differential Analyser  
machine analogique permettant l'intégration  
de système d'équations différentielles  
avec traçage des solutions en graphiques



Si l'intensité des rayons est la même dans toutes les directions :  
Alors la distribution d'intensité des rc , d'une énergie donnée, atteignant la Terre  
en un point précis, reste isotrope dans tout le cône représentant les  
directions d'accès possibles en ce point

Lemaître va donc calculer la forme de ce cône ( pb très compliqué ( orbites  
périodiques et asymptotiques au méridien)

Lemaître ( et Vallarta ) trouve :

pour des rayons cosmiques d'une énergie donnée et venant de l'infini,

il existe une latitude géomagnétique  $\lambda_1$  telle qu'aucune particule de cette énergie ne puisse atteindre la Terre à une latitude comprise entre l'équateur et  $\lambda_1$   
( le cône de Störmer se referme en entier )

il existe aussi une latitude géomagnétique  $\lambda_2$  au-dessus de laquelle les particules de cette énergie peuvent atteindre la Terre dans toutes les directions  
( ouverture du cône)

entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  les particules de cette énergie touchent la Terre dans le cône

comme il y a une relation entre l'ouverture du cône et l'intensité des rayons en un point  
Lemaître avait démontré l'effet de latitude Compton sur les rayons

réaction de Störmer : « it's a failure! »

de 1933 à 1945 Lemaître va engager ses étudiants, ses thésards et assistants au calcul d'orbites et à déterminer les directions d'accès des rayons cosmiques  
Il trouvera des orbites en termes de séries de Fourier!

# L' hypothèse de l'homme Primitif

## Chapitre 1 - La Grandeur de l'Espace.

Le grand mathématicien et géomètre de l'Antiquité Archimède de Syracuse, s'adressant au roi Gélon qui partageait le pouvoir avec son père Hiéron de Syracuse, commence ainsi un de ses plus curieux ouvrages : l'Arénaire ou les grains de sable

"D'aucuns pensent ... AT ( $\equiv$  ancien texte)  
p. 5 l. iii à part

..... que tout l'espace soit mesuré? AT p. 6

Telle est la question que nous nous proposons d'examiner en montrant comment les progrès de l'Astronomie de la géométrie et de la physique permettent d'y répondre dans une certaine mesure.

L'objet plus spécial qui avait en vue Archimède ne présente plus d'intérêt, puisque le système ~~de~~ de numération auquel nous sommes habitués permet d'écrire immédiatement des nombres aussi grand que nous voulons.

La première ... AT

... une multitude infinie

Quelque grand que soit un nombre, je puis en concevoir un autre qui soit plus grand. C'est aussi que l'introduit l'infini dans les mathématiques. Néanmoins un nombre déterminé ne peut être le dernier, le plus grand des nombres.

Quand nous disons ... AT

1945  
devant la Société Helvétique  
des Sciences

édition de la compilation de ses  
articles



George Gamow  
Professor Of Physics  
at The George Washington University  
from 1934 to 1936

Gamow (1904-1968) is renowned for developing the "Big Bang Theory" of the universe (1948); explaining nuclear alpha decay by quantum tunneling (1928); describing, with Edward Teller, spin-induced nuclear beta decay (1936); pioneering the liquid-drop model in nuclear physics (1928); introducing the "Gamow" factor in stellar reaction rates and element formation (1938); modeling red giants, supernovae, and neutron stars (1939); first suggesting how the genetic code might be transcribed (1954); and popularizing science through a long series of books, including the adventures of "Mr. Tompkins" (1939-1967)

This plaque is placed in honor of their colleague George Gamow  
by the  
Physics Department  
of  
The George Washington University

April 2000



# Gamov,

élève de Freidmann,  
admirateur de Lemaître

rajoute la notion  
de température au big bang ( 1948 )  
avec la nucléosynthèse primordiale  
... et imagine un  
rayonnement initial

# électromagnétique

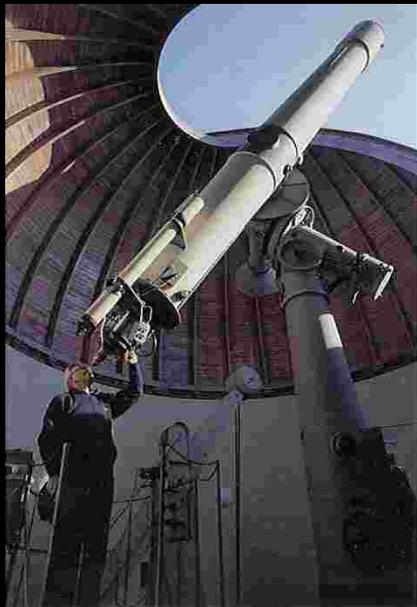
pour trouver les solutions numériques  
de systèmes d'équations différentielles

**Lemaître devient programmeur**  
introduit l'informatique scientifique en Belgique  
et revient mathématicien  
en perfectionnant la méthode  
Runge Kutta





# Vatican Observatory





# Vatican Observatory

Secchi, Rev. Pietro Angelo (1818-1878)

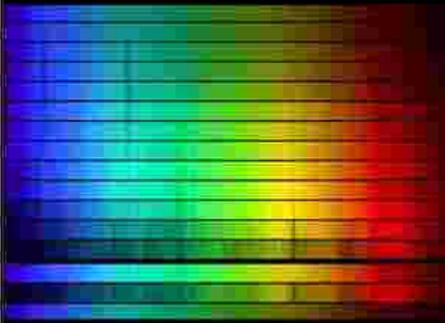
Père de l'Astrophysique  
Fondateur de la  
spectroscopie

## La première classification spectrale des étoiles

Angelo Secchi fut le premier à **utiliser un prisme rond devant la lentille d'un télescope** pour analyser les composantes de la lumière (ou rayonnement lumineux) qui nous vient des étoiles. Il voulait découvrir si la composition des étoiles était aussi variée que leur nombre. Il a analysé **4000 étoiles** et les a classées, selon leur coloration, en quatre types.

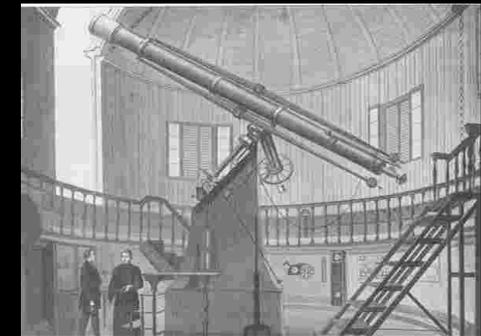
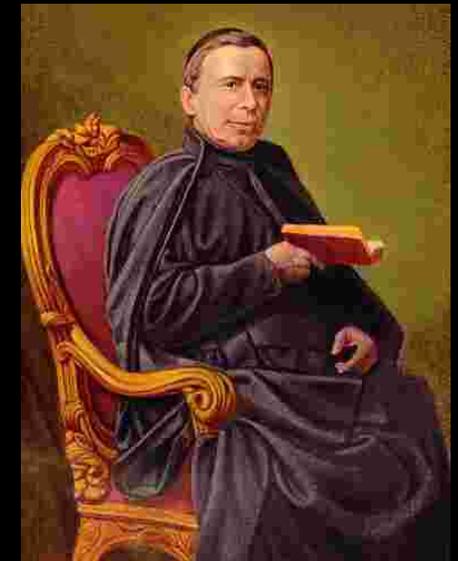
Aujourd'hui la classification par température continue à faire usage des types spectraux introduits par Secchi en 1877. Des plus élevées au plus basses, ce sont les types O, B, A, F, G, K, M. On cite souvent à leur sujet la petite phrase mnémotechnique en anglais : « **Oh Be A Fine Girl, Kiss Me** ». La correspondance entre type spectral et température superficielle est la suivante :

Type spectral	Température superficielle (K)
O	> 25 000
B	11 000 - 25 000
A	7 500 - 11 000
F	6 000 - 7 500
G	5 000 - 6 000
K	3 500 - 5 000
M	< 3 500



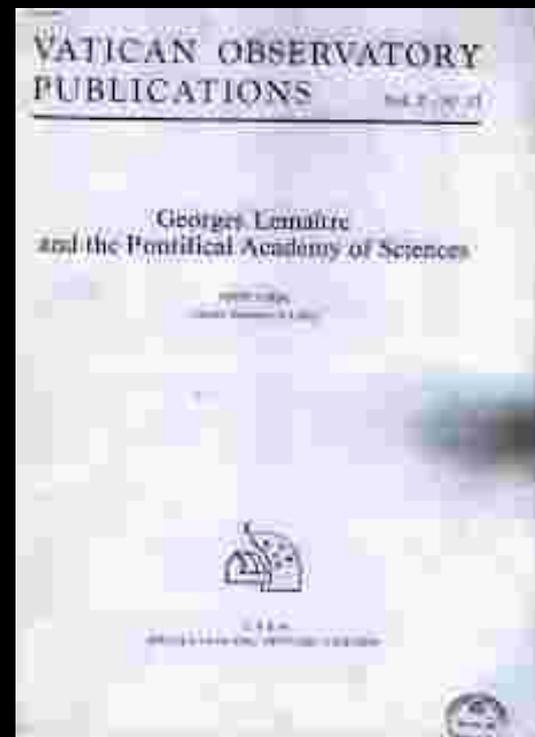
during his stay in America. He studied prominences during eclipses, both visually and spectroscopically, and provided the first demonstrations that prominences are features belonging to the Sun.

Royal Society and Royal Astronomical Society, of the French Académie des Sciences, and of Russia's Imperial Academy of St. Petersburg. In Italy he presided for many years over the Accademia dei Nuovi Lincei, and founded the Società degli Spettroscopisti Italiani, devoted to spectroscopic studies of the Sun.





1935



l'Observatoire Steward de l'Université d'Arizona de Tucson.

En 1993, l'observatoire du Vatican, par l'intermédiaire du VORG installe son télescope, le Vatican Advanced Technology Telescope sur le Mont Graham au sein de l'Observatoire international du Mont Graham.



fiat lux ?:  
non





Semaine d'Etudes on Stellar Populations,  
Vatican, 1957



PIVS · III · PONTIFEX · OPTIMVS · MAXIMVS

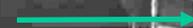
Steven Weimberg



Rees

Oort

Hoyle



Stephen Hawking



# Solvay-congres van 1958. Brussel



1958. HET SOLVAY CONGRES VAN 1958. BRUSSEL. De afgevaardigden van de Solvay-conferentie van 1958. De afgevaardigden van de Solvay-conferentie van 1958. De afgevaardigden van de Solvay-conferentie van 1958.

It was actually Hoyle who coined the name of Lemaître's theory, referring to it sarcastically as "this 'big bang' idea" during a radio broadcast on 28 March 1949, on the BBC Third Programme. Hoyle repeated the term in further broadcasts in early 1950, as part of a series of five lectures entitled *The Nature of The Universe*.

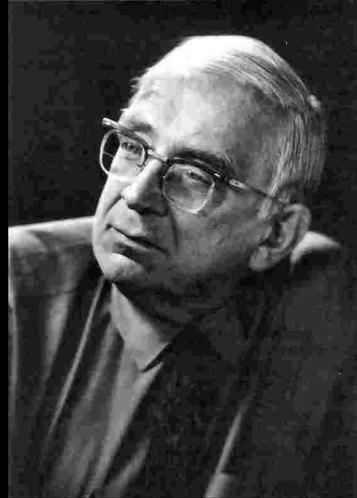
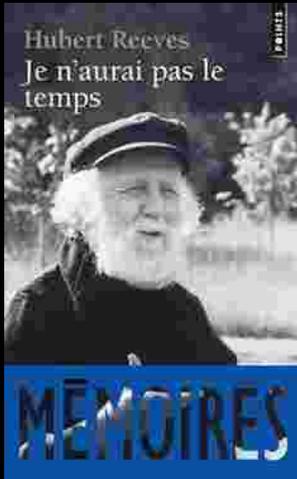


1949  
Fred Hoyle  
adepte de l'Univers stationnaire  
tente de ridiculise Lemaître  
en utilisant les mot « Big Bang »



1964 Louvain rencontre Reeves Lemaître

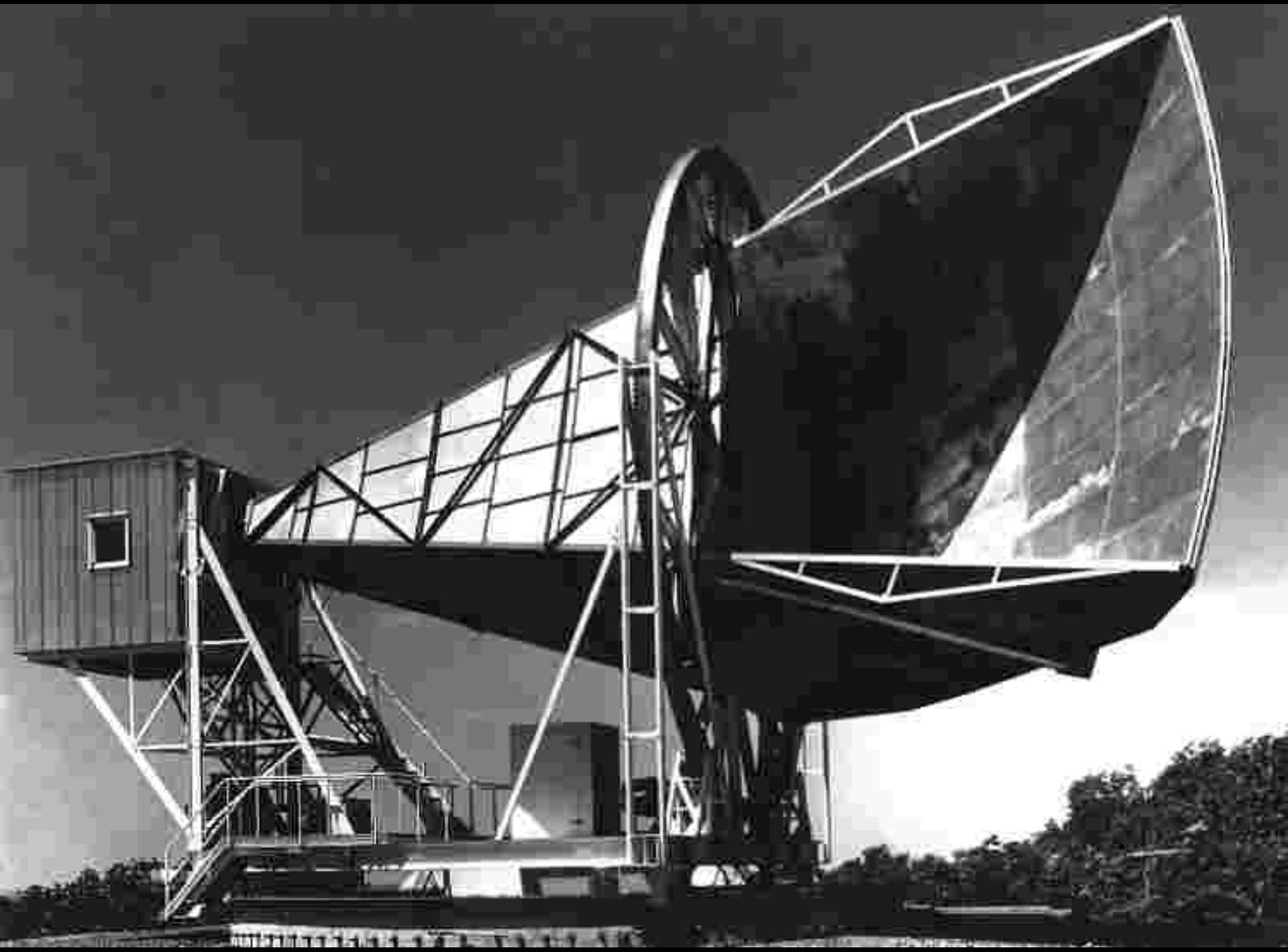
nucléosynthèse



Gamov: histoire thermique de l'Univers

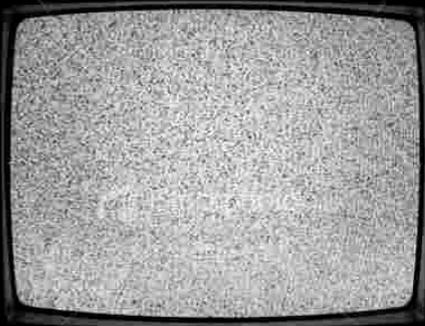


Chopin





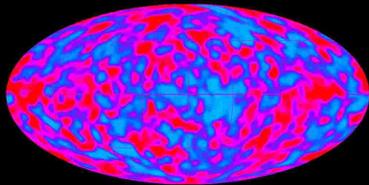
The static seen on old analog TVs is residual radiation from the Big Bang.



[did-you-kno.tumblr.com](http://did-you-kno.tumblr.com)



# CMB



$$T = 2,735^{\circ}\text{K}$$

Le 16 juin 1966 à l'hôpital de Louvain  
Odon Goddart, son assistant, apporte à Lemaître  
malade d'une leucémie  
l'exemplaire de l'Astrophysic Journal  
annonçant la découverte du rayonnement 3K  
Lemaître meurt le 20 juin.

Bien que lui même évêque aucun évêque belge  
flamand  
n'assistera à ses obsèques.



# Marcinelle



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

Note de M. l'abbé G. LEMAITRE

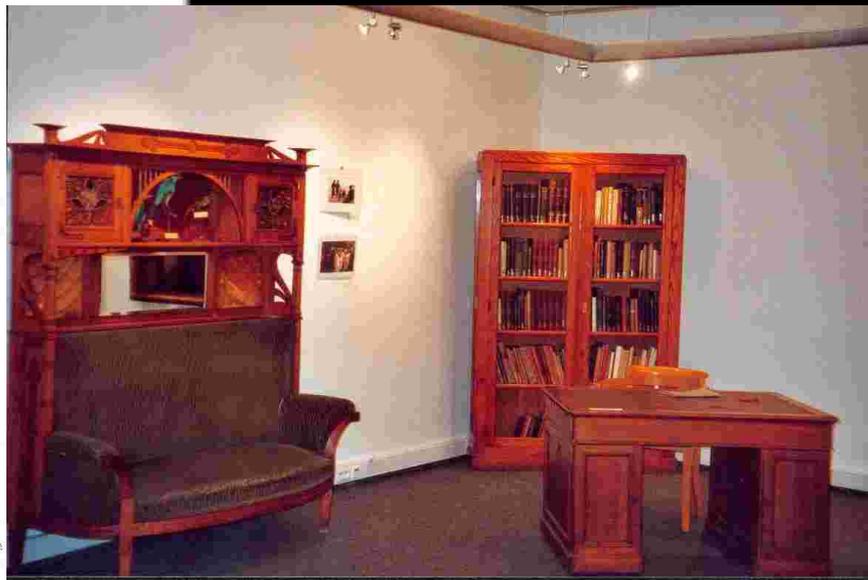
1. GÉNÉRALITÉS.

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  $\pi R$ , 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 <sup>(1)</sup>.

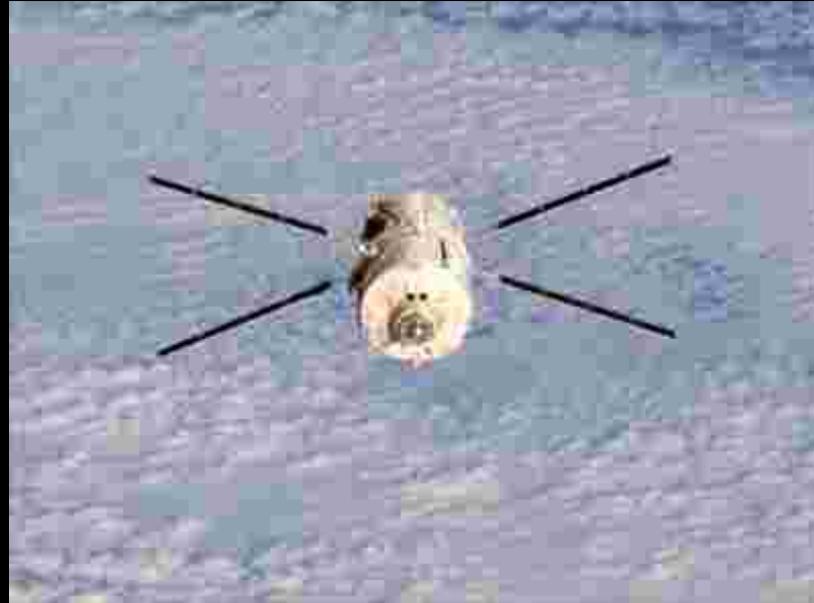
Deux solutions ont été proposées. Celle de DE SITTER ignore la présence de la matière et suppose sa densité nulle. Elle conduit à certaines difficultés d'interprétation sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, mais son grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extra-galactiques 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.

L'autre solution est celle d'EINSTEIN. Elle tient compte du fait évident que la densité de la matière n'est pas nulle et elle conduit à une relation entre cette densité et le rayon de l'univers. Cette relation a fait prévoir l'existence de masses énormément supérieures à tout ce qui était connu lorsque la théorie a été pour la première fois comparée avec les faits. Ces masses ont été depuis découvertes lorsque les distances et les dimensions des nébuleuses extra-galactiques ont pu être établies. Le rayon de l'univers calculé par la formule d'Einstein est d'après les données récentes quelques

(1) Nous considérons l'espace simplement elliptique, c'est-à-dire sans antipodes.



the first Automated Transfer Vehicle (ATV), which made a flawless flight in 2008, was named after French science fiction writer Jules Verne. It was followed in 2011 by ATV-2, named in honor of German mathematician and astronomer Johannes Kepler. It will be the turn of the third ATV, named after the Italian physicist and space pioneer Edoardo Amaldi, to head towards the space station on March 9. ATV-4, aiming for launch in early 2013, carries the name of Albert Einstein.

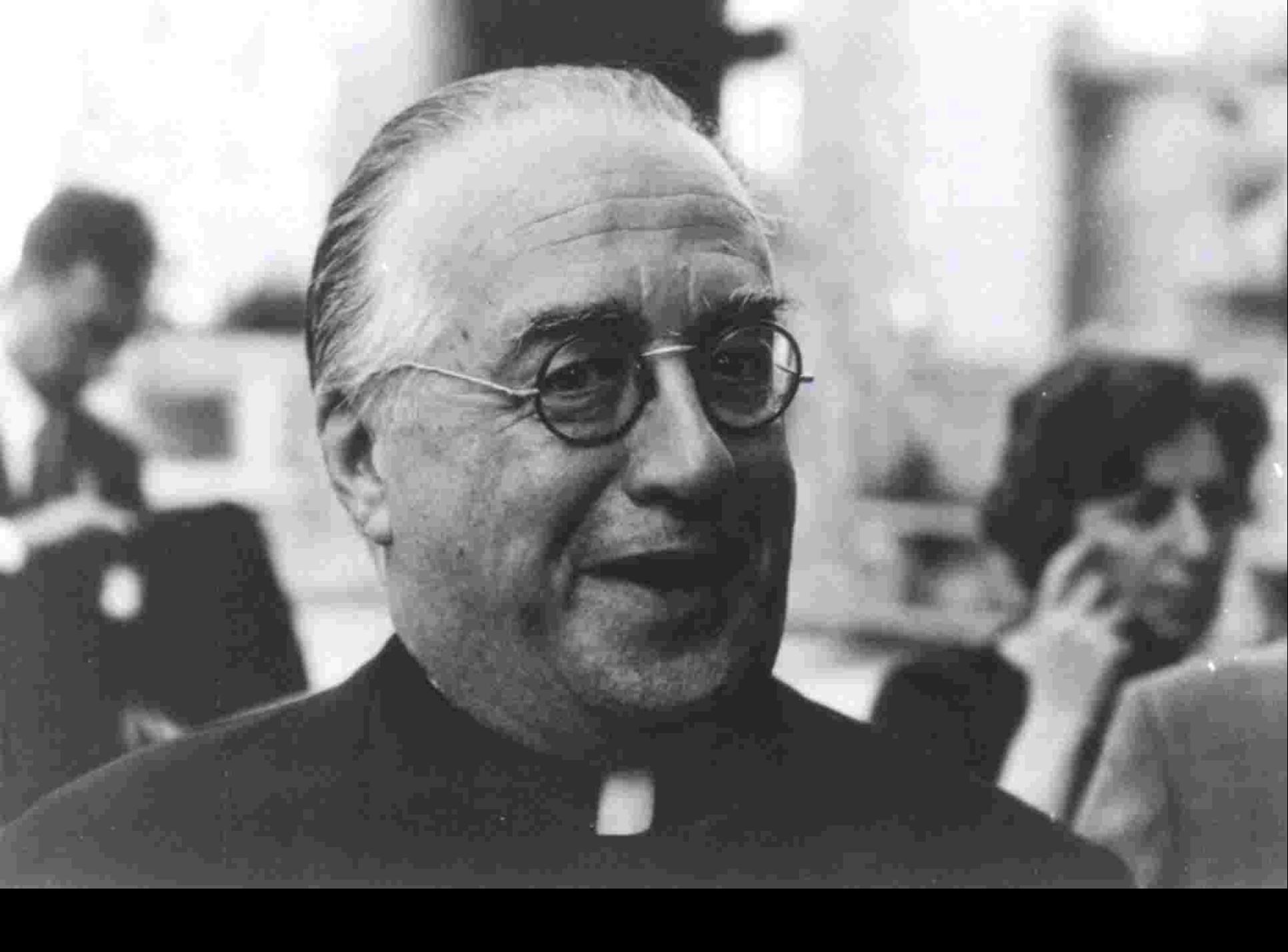


**Naming the last vehicle of the family, ATV-5, after Belgian physicist Georges Lemaître, father of the Big Bang theory, continues this approach.**

The space station depends on regular deliveries of experiment equipment and spare parts, as well as food, air and water for its crew. Since 2008, every year and a half, an ATV has delivered about 6 tonnes of cargo some 400 km above Earth. After launch on an Ariane 5 from Europe's Spaceport in French Guiana, ATV automatically navigates to a precision docking with the Station's Russian Zvezda module.

formules sur une  
porte en forme de soutane  
Castel Gandolfo







Remerciements :

Archives LEMAÎTRE

Liliane MOENS Institut d'Astrophysique Georges LEMAÎTRE Louvain

Isabelle SABLE archives Société Astronomique de France

Marie-Alice MASSON Maison Lemaître Charleroi

Jean Pierre LUMINET CNRS Luth

Dominique LAMBERT Université de Namur

Université de Louvain La Neuve

Crédits : American Institute of Physics

Center for History of Physics

CALTEC

Archives LEMAÎTRE

Université Libre de Bruxelles

Yerkes Observatory



