

A hand holding a magnifying glass over a cosmic marble. The marble shows a detailed view of the Milky Way galaxy, with its spiral arms and central core. The background is dark with blue bokeh lights.

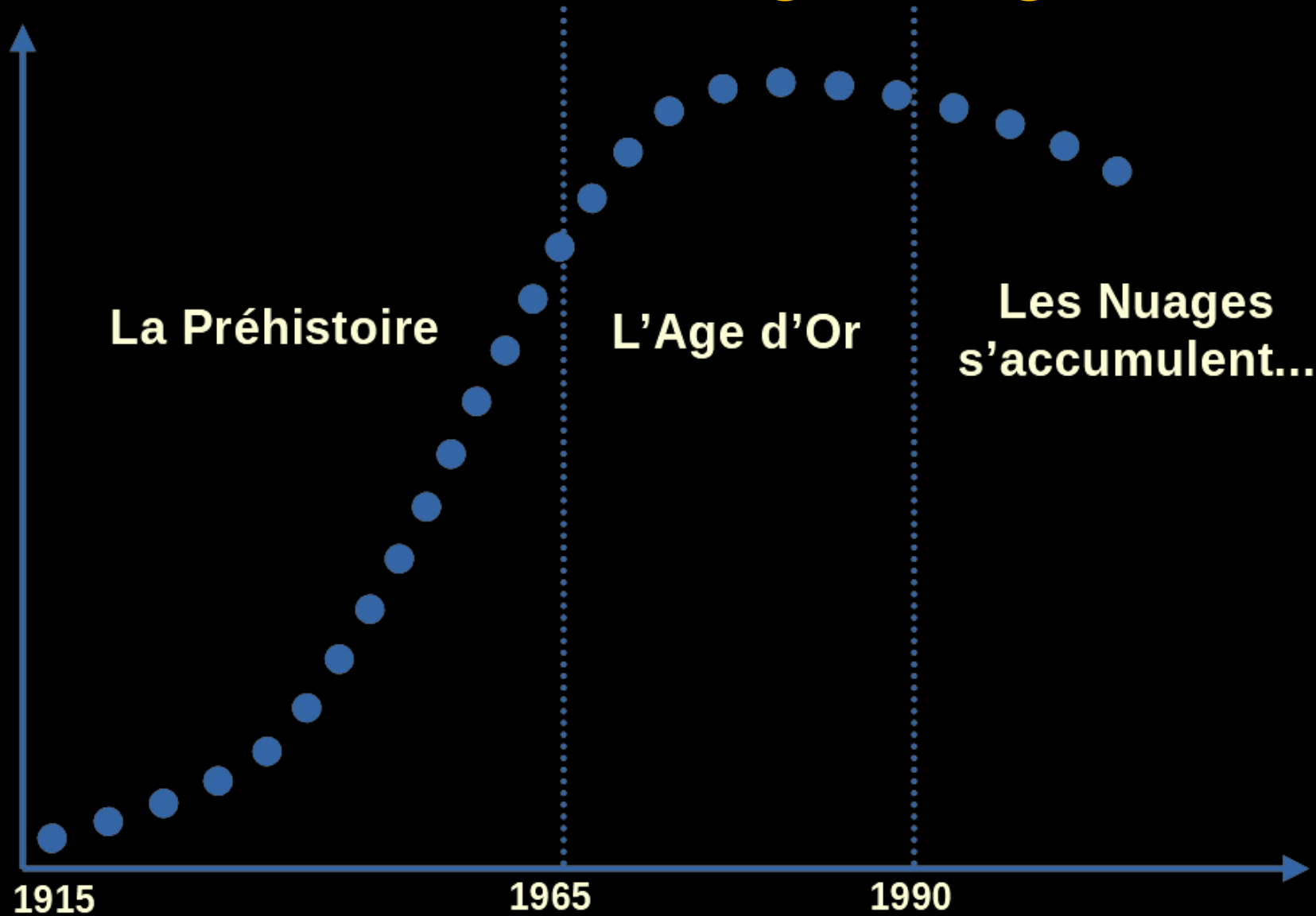
Une brève histoire du Big Bang !

Jean-Noël Antoine

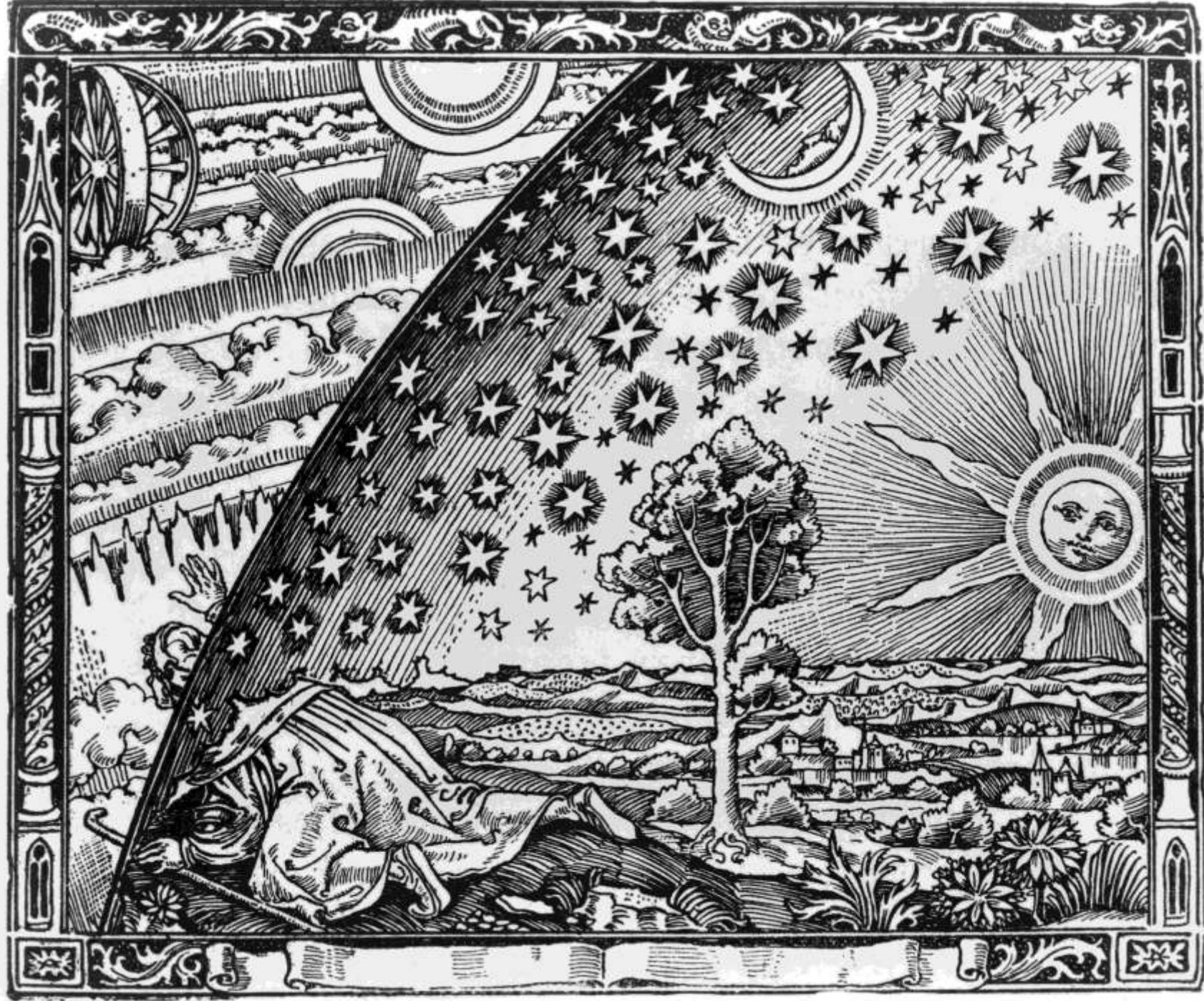
Rennes, 15 mars 2022

pour l'Association Centrale-Supélec Bretagne

Une brève histoire du Big Bang



Camille Flammarion – 3^{ème} édition de L'atmosphère,
météorologie populaire - p. 163 (1888)



WE NEED TO CHANGE SPACE
AND TIME TO MAKE THINGS WORK!



Illustration by Randall Munroe – The New Yorker – November 18, 2015



1907 – Bern, Einstein tombe de sa chaise...

1915 – Einstein publie la théorie de la Relativité Générale



Hendrik Lorentz
1853 - 1928



Marcel Grossmann
1878 - 1936



David Hilbert
1862 - 1943



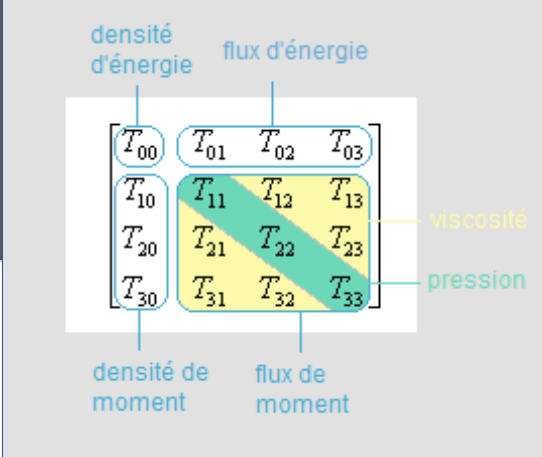
Emmy Noether
1882 - 1935

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Les équations du champ de Gravité d'Einstein



Tenseur de Ricci

Tenseur métrique

Constante de gravitation de Newton

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

Tenseur Impulsion-Energie

Indices des coordonnées d'espace-temps

Courbure scalaire

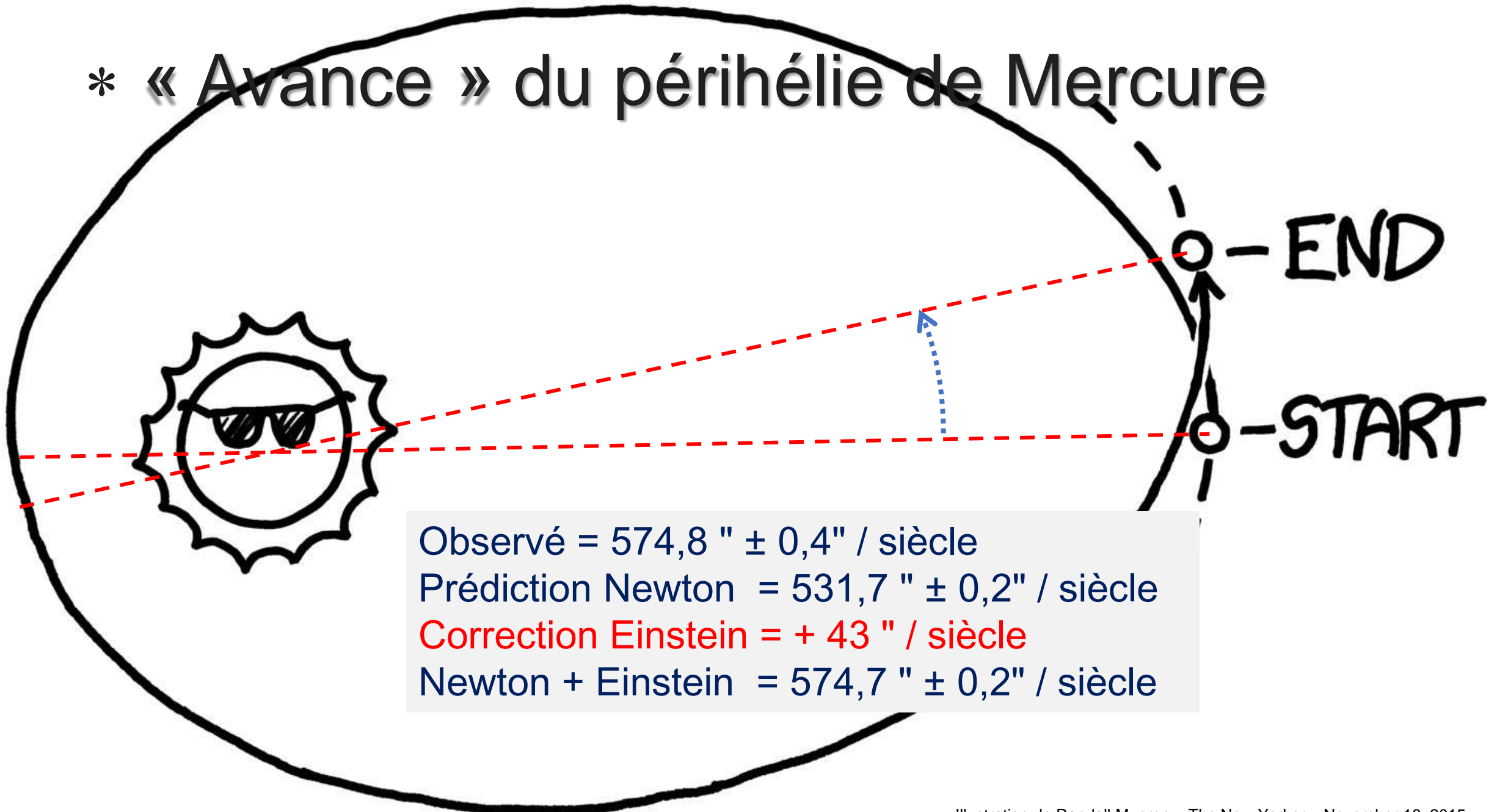
Vitesse de la lumière

Ce qui change avec la Relativité Générale

- La Gravité devient une propriété de l'Espace-Temps qui possède une *géométrie non Euclidienne* et se courbe en présence de matière et d'énergie.
- L'Espace-Temps n'existe plus indépendamment de la matière et de l'énergie (Leibniz versus Newton).
- La Force d'attraction universelle de Newton disparaît.
- Les trajectoires des points matériels suivent des *géodésiques*.
- La Gravité se *propage* à la même vitesse que la *lumière*.

Quelques phénomènes
extrêmement bien modélisés
par la Relativité Générale !

* « Avance » du périhélie de Mercure



Observé = $574,8'' \pm 0,4''$ / siècle
Prédiction Newton = $531,7'' \pm 0,2''$ / siècle
Correction Einstein = + 43'' / siècle
Newton + Einstein = $574,7'' \pm 0,2''$ / siècle

* Déviation des rayons lumineux par la matière



Observé lors d'une éclipse de Soleil le 29 mai 1919
par Arthur Eddington.

* Ralentissement / Dilatation du temps dans un champs de gravité

One hour on this planet is 7 years on Earth

Great!
I'll do my PhD here

« Interstellar » Christopher Nolan, 2014

* Lentilles et mirages gravitationnels

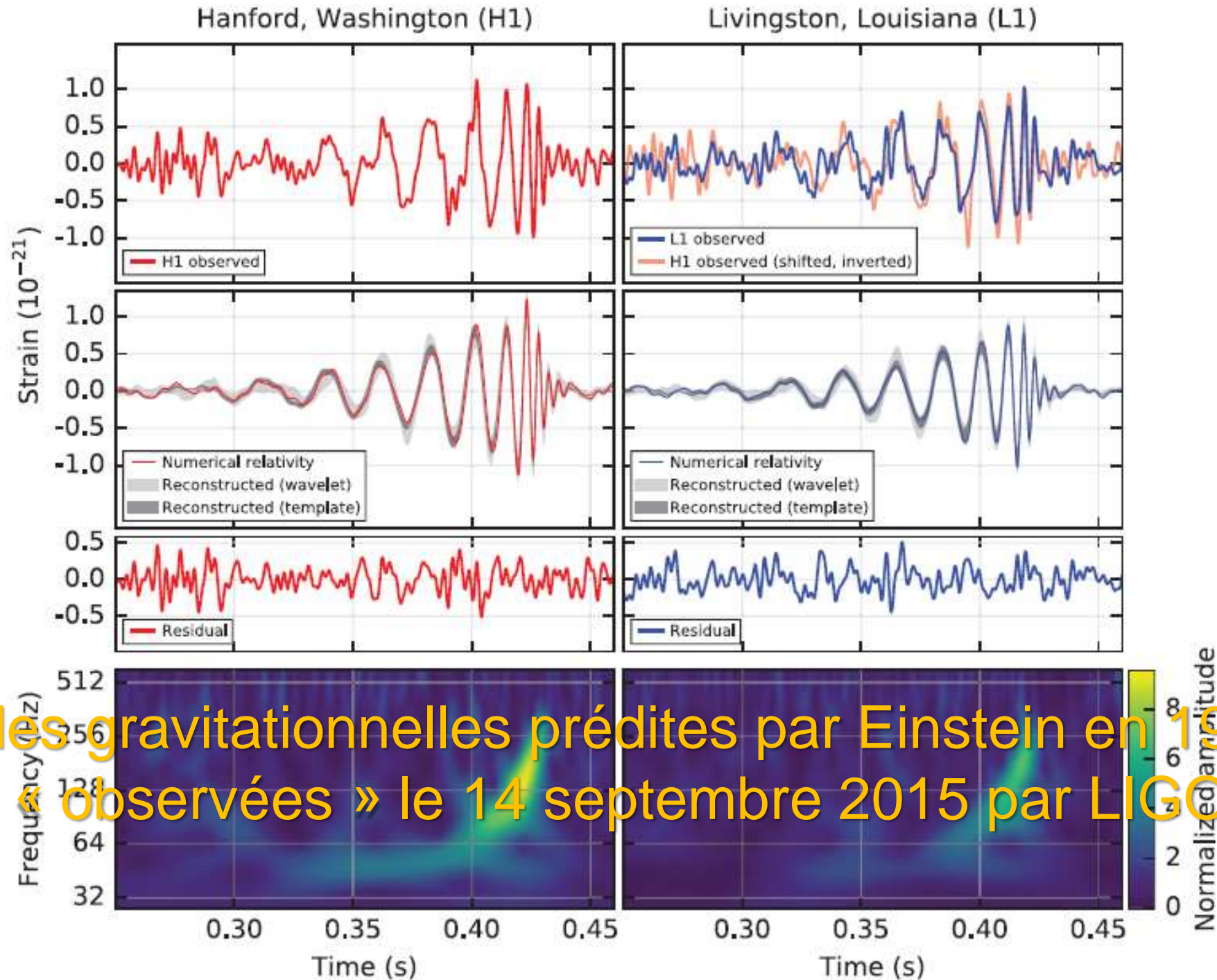
Streaks and arcs present in Abell 370, a distant galaxy cluster some 5-6 billion light-years away.
NASA, ESA/Hubble, HST Frontier Fields.

* Trous Noirs

prédis par Karl Schwarzschild dès 1916.



Pour sa représentation d'un trou noir basée sur les équations d'Einstein, Jean-Pierre Luminet a dessiné quelque 10 000 points à la main. «Le halo en pointillé que l'on voit au-dessus du trou noir, c'est l'autre côté de l'objet dont les rayons ont été déformés.» (1979)



* Ondes gravitationnelles prédites par Einstein en 1916 et observées » le 14 septembre 2015 par LIGO.

* Fusion de deux étoiles à neutrons ou de deux Trous Noirs

Image de simulation de la fusion d'un système de trous noirs binaire - *SXS Lensing*



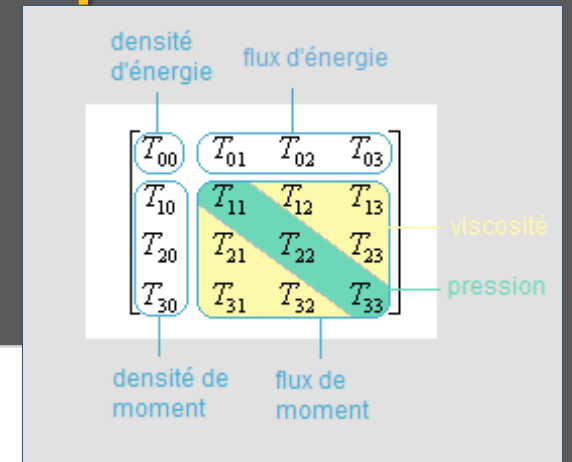
1917 – La Cosmologie devient une Science

- A. Einstein "*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*", Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Phys.-Math. Klasse VI, 142 (1917)
- Einstein applique la relativité générale pour la première fois à l'Univers en entier en tant qu'objet physique
- Einstein introduit la **Constante Cosmologique (Λ)**
- Début de la cosmologie scientifique moderne



« *Ich habe wieder etwas verbrochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr bringt, in ein Tollhaus interniert zu werden* »

Les équations modifiées du champ de Gravité d'Einstein



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

The equation is annotated with labels for its components:

- $R_{\mu\nu}$: Tenseur de Ricci
- R : Courbure scalaire
- $g_{\mu\nu}$: Tenseur métrique
- Λ : Constante Cosmologique
- G : Constante de gravitation de Newton
- c : Vitesse de la lumière
- $T_{\mu\nu}$: Tenseur Impulsion-Energie
- μ, ν : Indices des coordonnées d'espace-temps

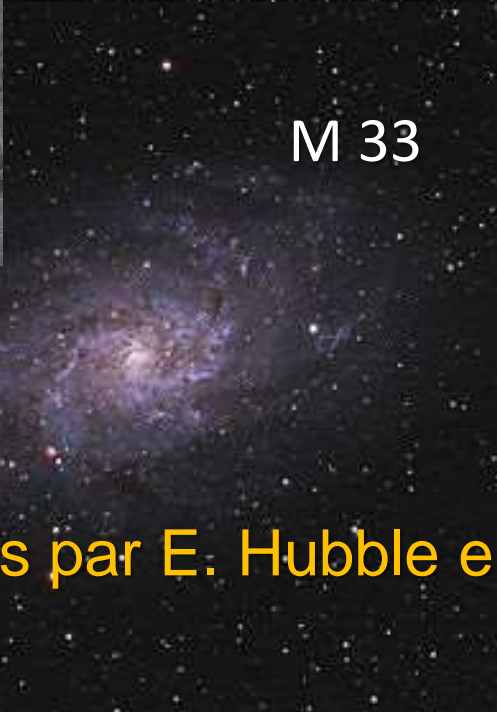
1920 – Le Grand Débat : Nébuleuses ou Galaxies ?



Harlow Shapley



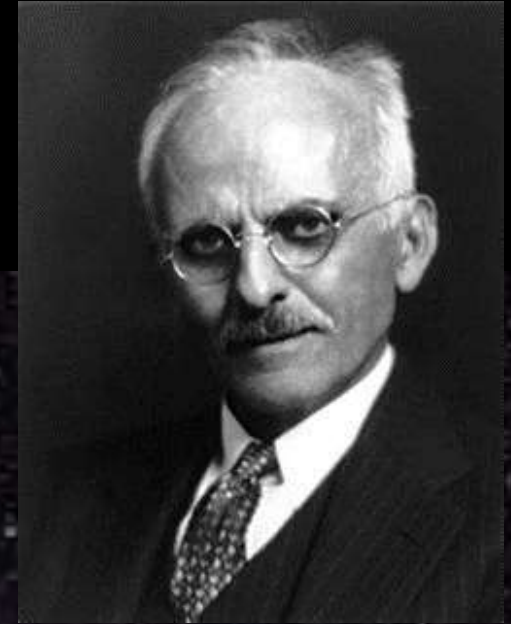
NGC 6822



M 33

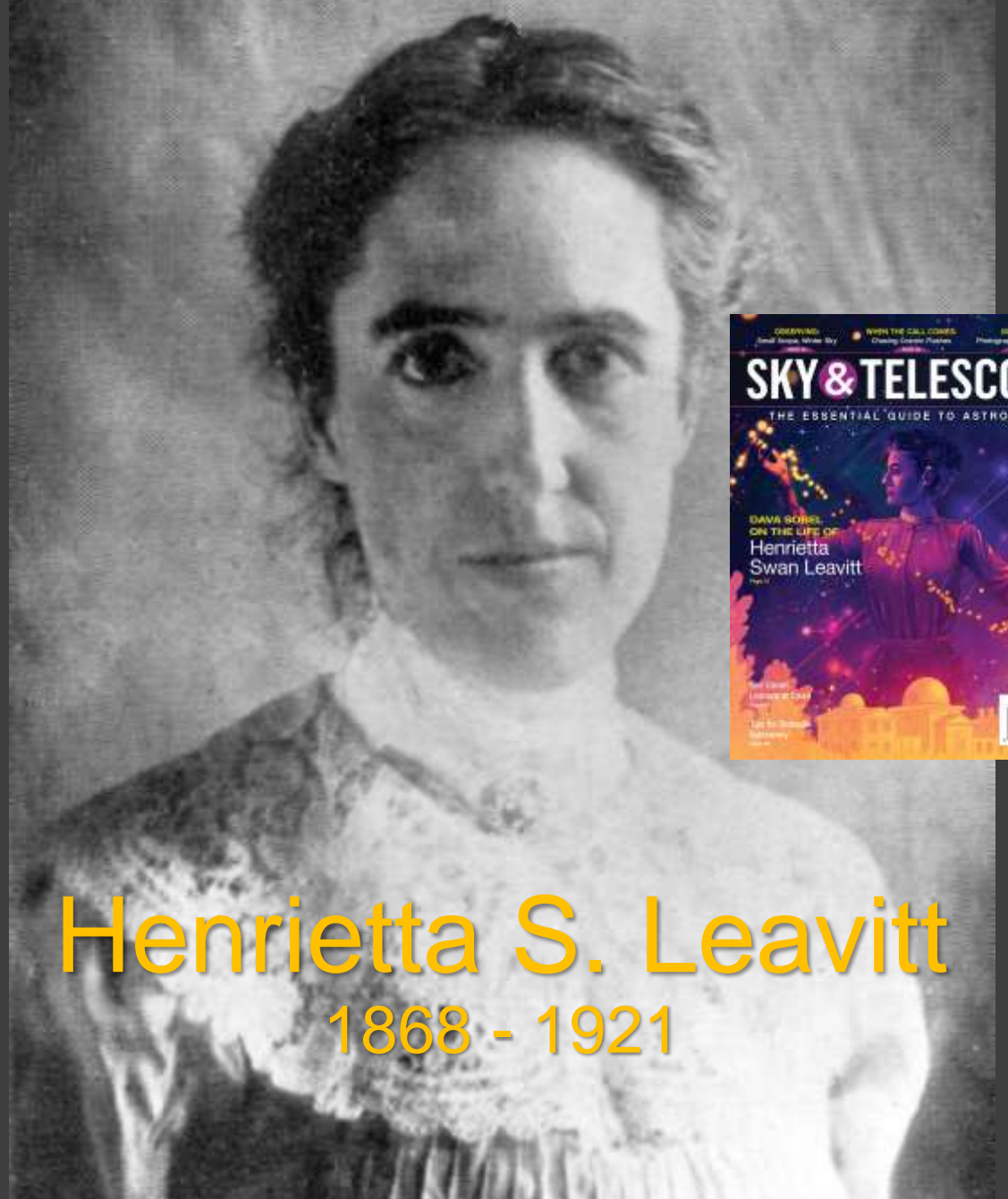


M 31 et M 32



Heber D. Curtis

➡ Clos par E. Hubble en 1924 par la mesure de distance de NGC 6822



Henrietta S. Leavitt
1868 - 1921

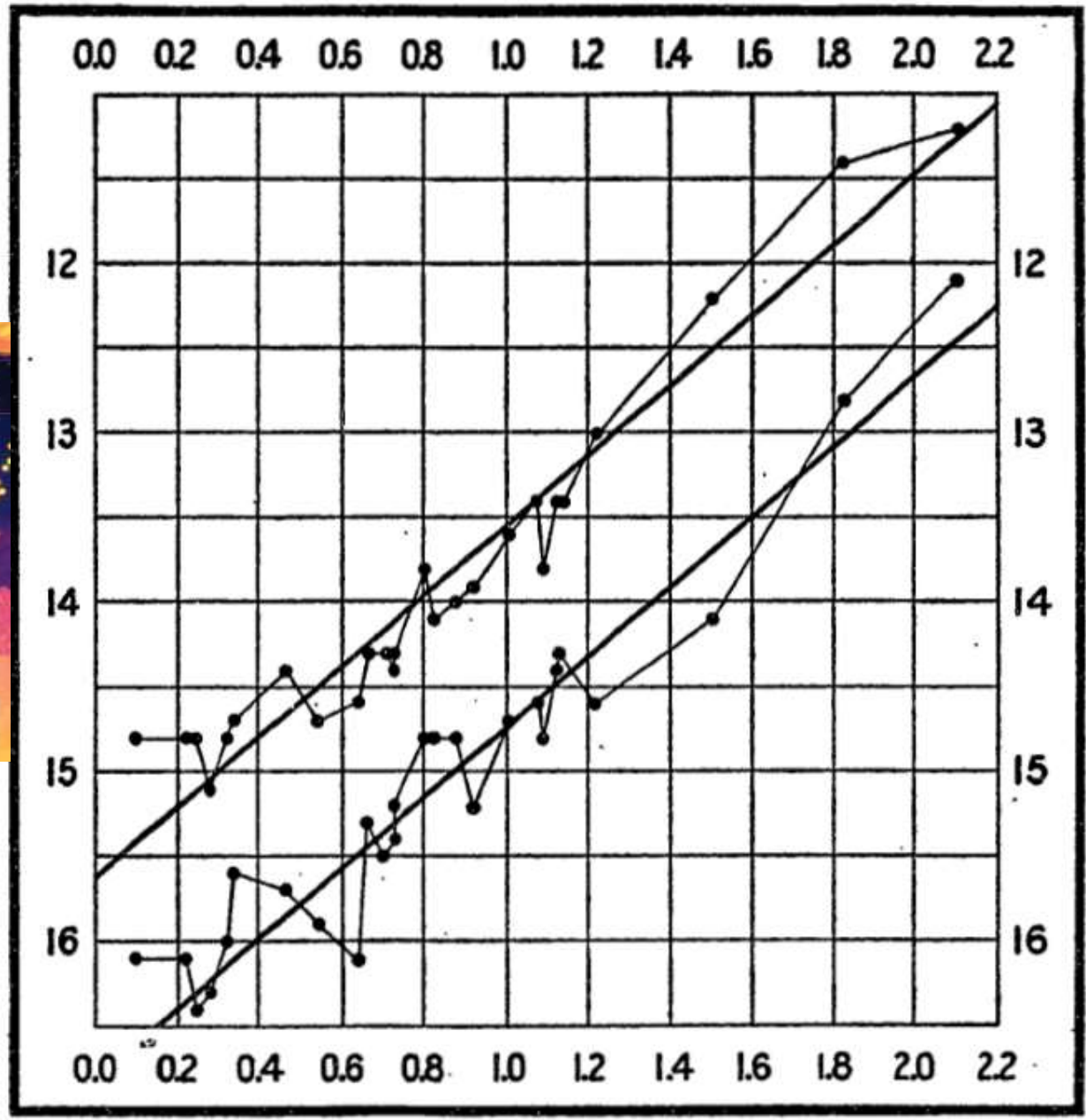
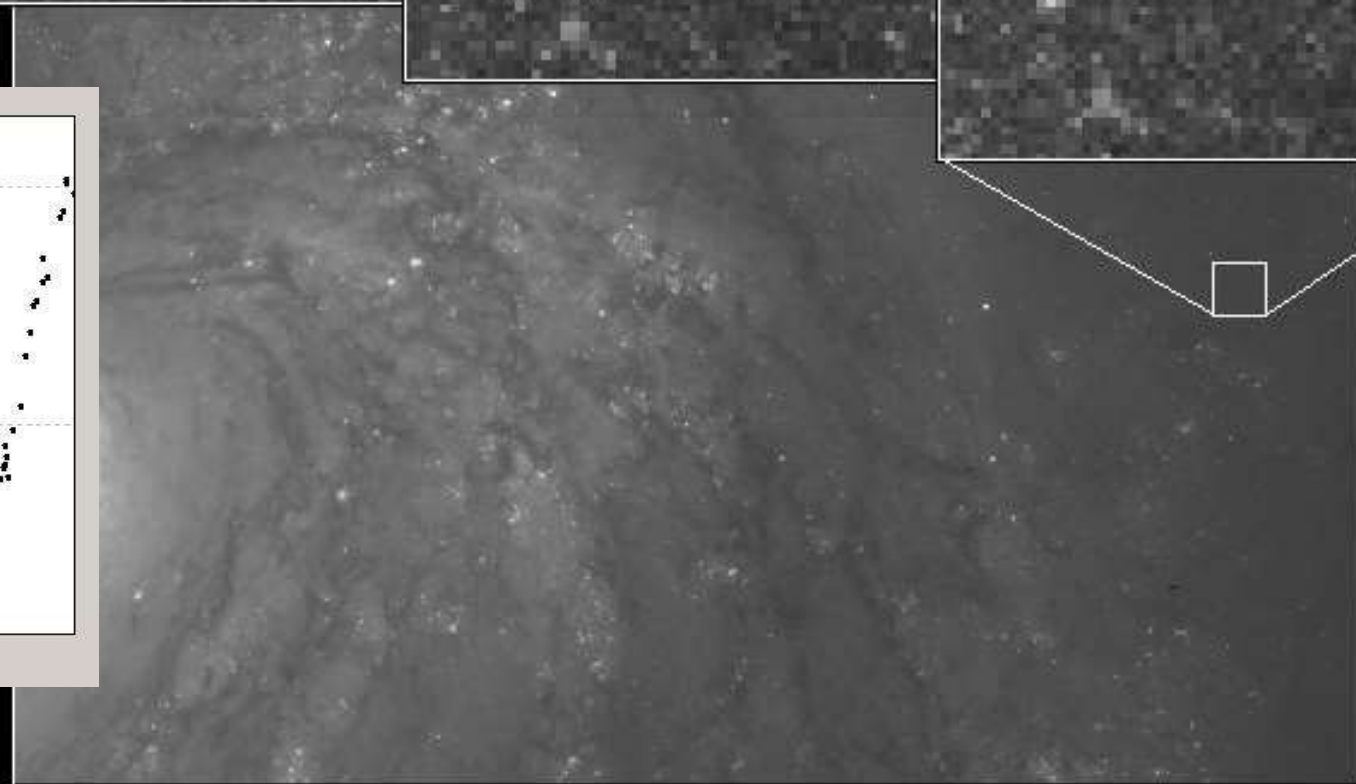
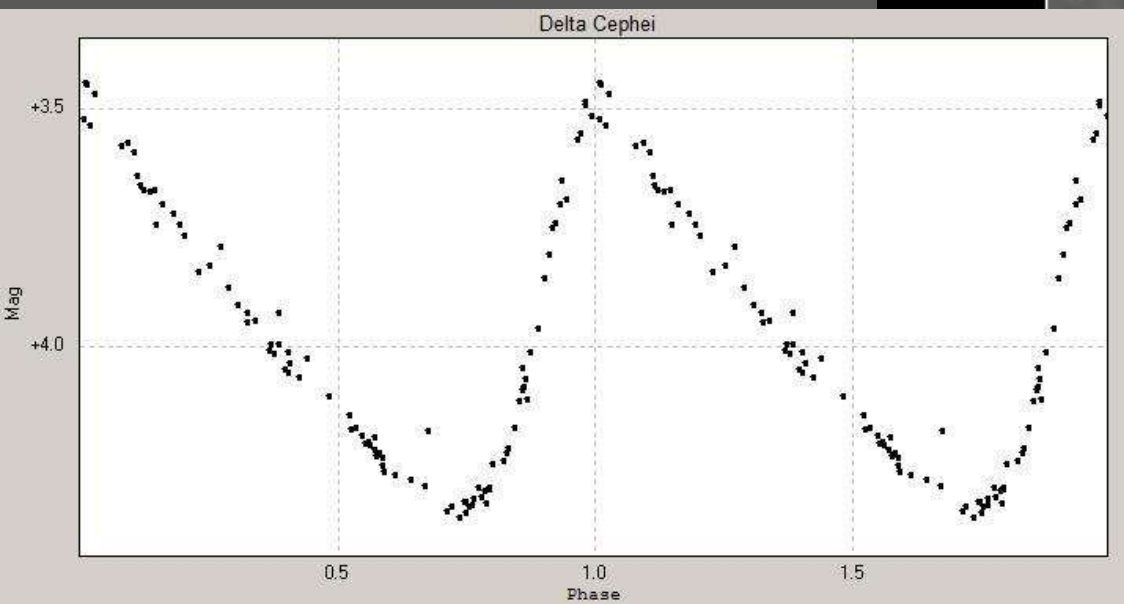
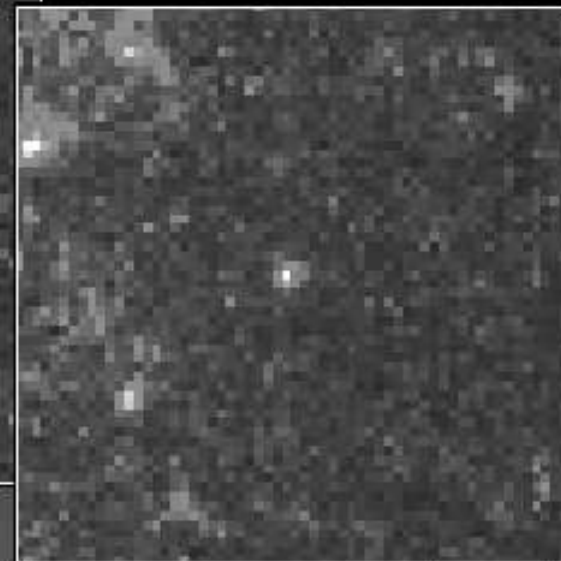
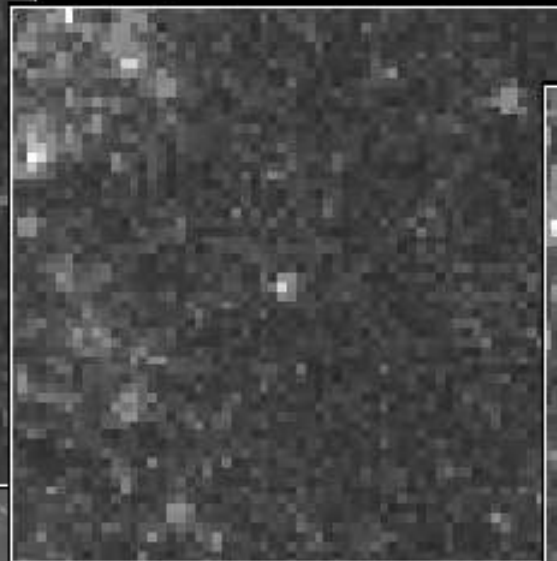
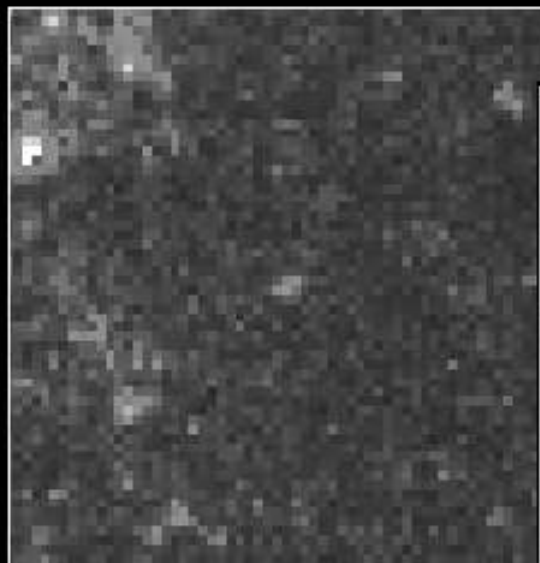
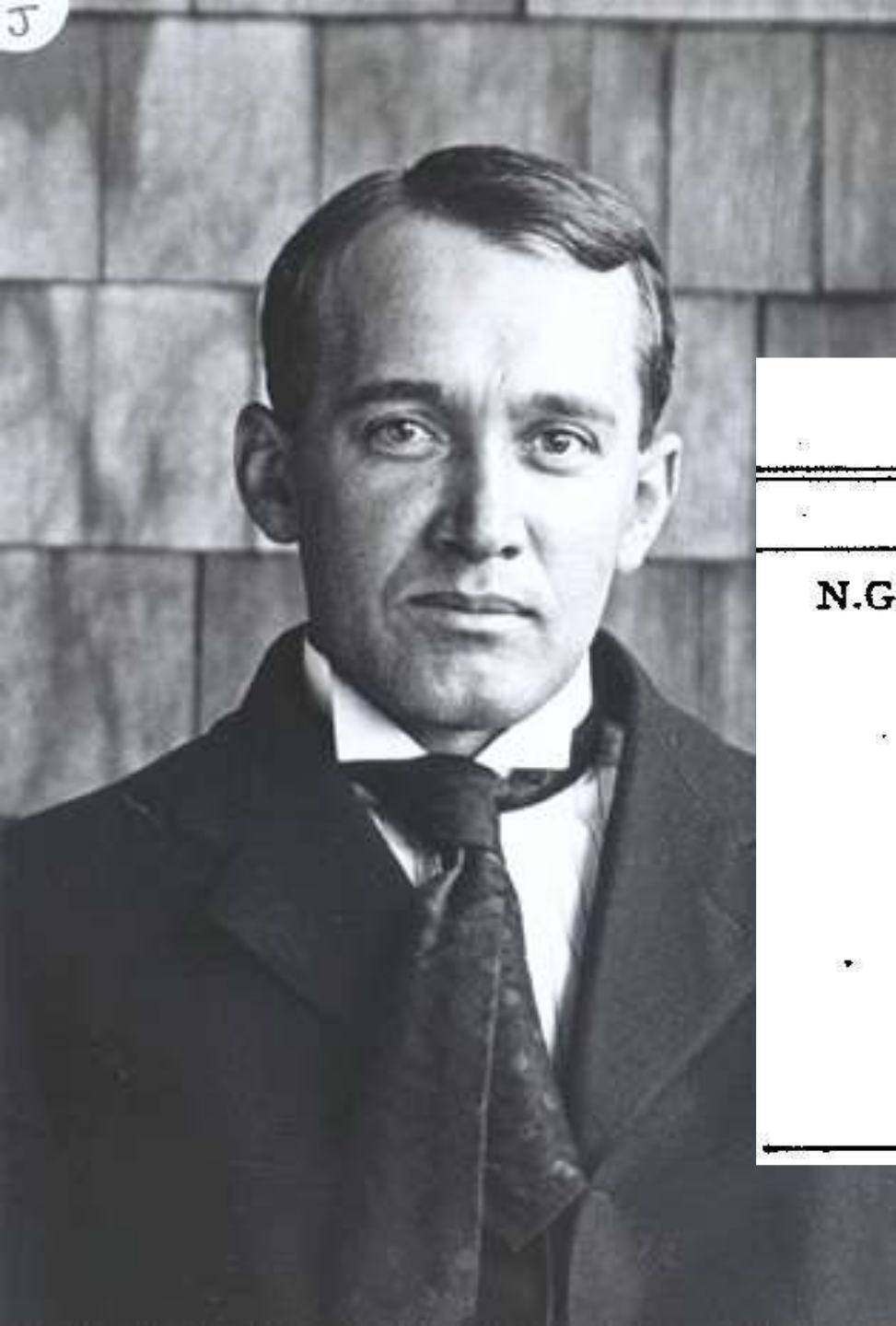


FIG. 2.

Céphéïdes
« chandelles
standards »

Cepheid Variable in M100
HST-WFPC2





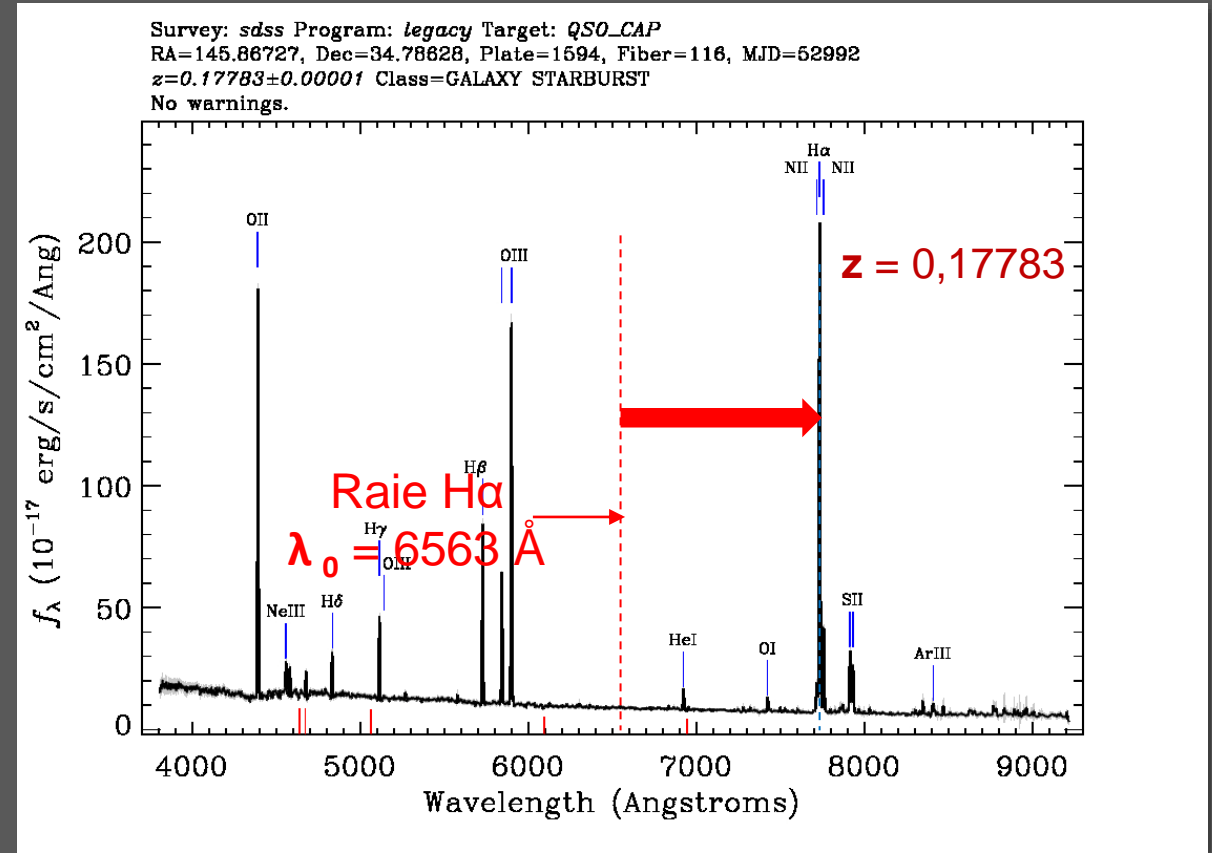
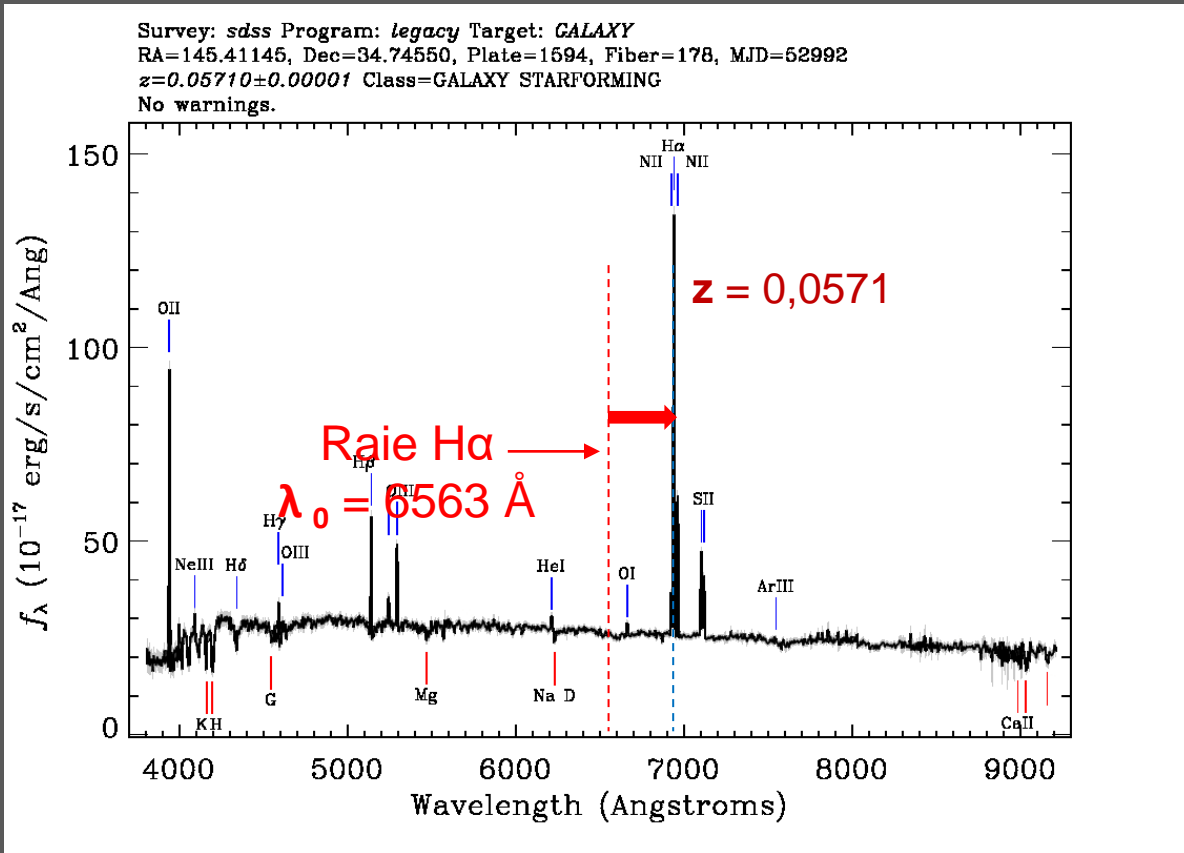
1922 - Vesto Slipher

RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

Galaxies : courage, fuyons !

- Décalage spectrale : $z = \frac{\lambda_{réception} - \lambda_{émission}}{\lambda_{émission}}$

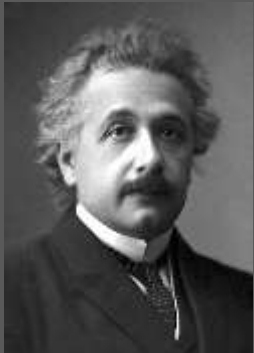


Effet Doppler-Fizeau : vitesse récession $v = z c$

1922 – Alexander Friedman

Friedman, A. (1922). *"Über die Krümmung des Raumes"*. Zeitschrift für Physik. 10 (1): 377–386.

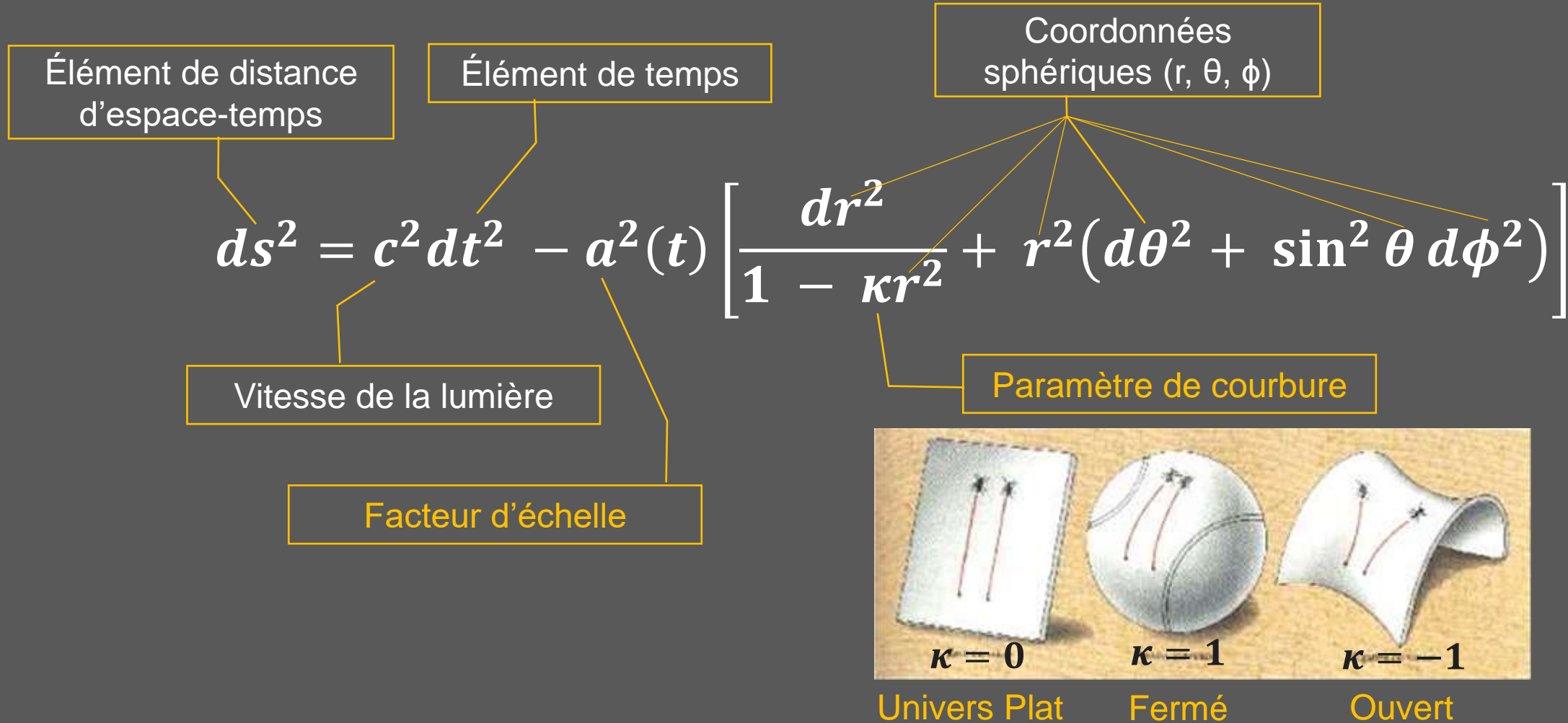
Friedman, A. (1924). *"Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes"*. Zeitschrift für Physik. 21 (1): 326–332.



A. Einstein, 1922: *"Friedmann's paper while mathematically correct is of no physical significance"*



Métrie de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker



Les apports d'Alexandre Friedmann

Famille de solutions d'Univers **dynamiques** et en **expansion**

- Une métrique solution des équations d'Einstein (**FLRW**)
- Un paramètre de courbure globale de l'espace-temps (κ)
- Un facteur d'échelle spatial **a(t)**

• Première et Seconde équation

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{\kappa c^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

• **Densité critique**

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-27} \text{ gr/cm}^3$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

ANNALES
DE LA
SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE

DE BRUXELLES

EXTRAIT

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^t MICHEL, 49
Compte chèques postaux 392-33

1927



1927 – Georges Lemaître publie un article fondamental

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

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

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

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⁾.

Equation (23) sera la loi de « Hubble »

$$v = H_0 r$$

v = vitesse d'effet Dopple-Fizeau

r = distance entre la source et le récepteur

$H_0 = R'/R$ paramètre de Hubble-Lemaitre en km/s/Mpc

Première détermination de H_0 par G. Lemaître \approx 625 km/s/Mpc

Un rayon émis un peu plus tard partira de σ_1 au temps $t_1 + \delta t_1$ et arrivera en σ_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 δt_1 est la période de la lumière émise, δt_2 est la

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

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

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

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⁾.

Effet « Lemaître » Décalage Spectrale Cosmologique « λ varie comme $R(t)$ ou $a(t)$ »

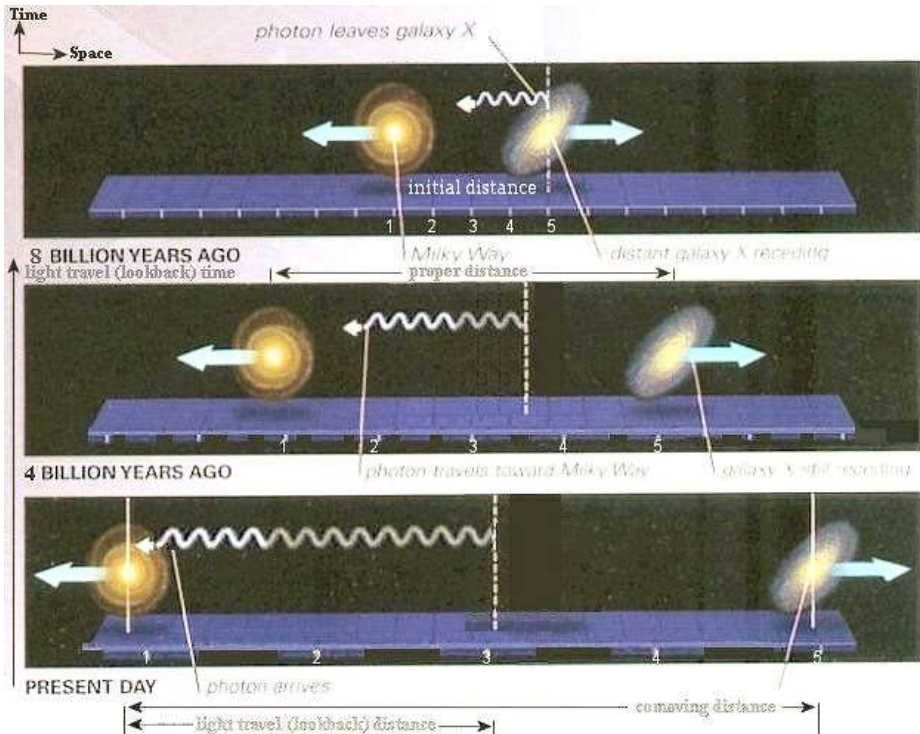
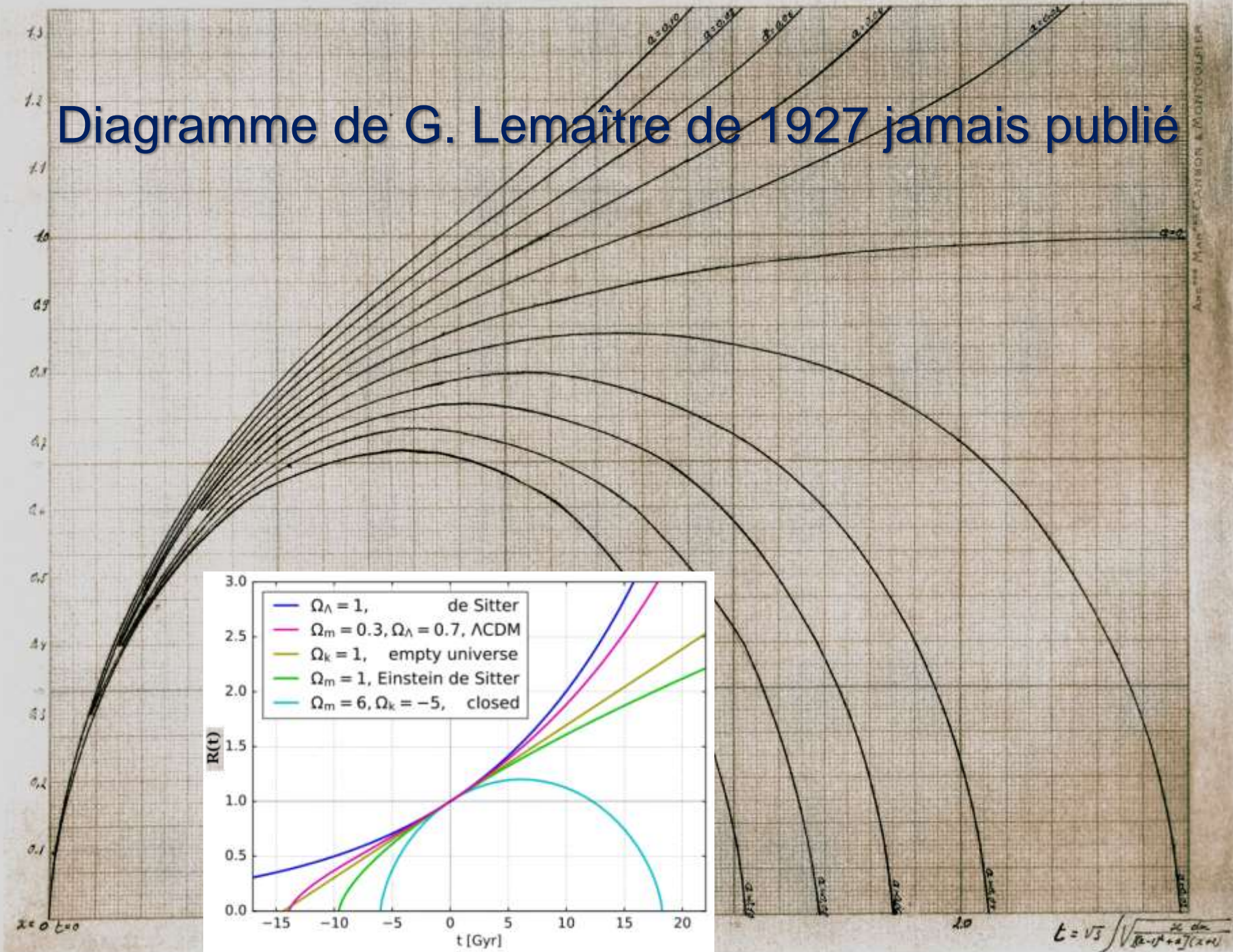


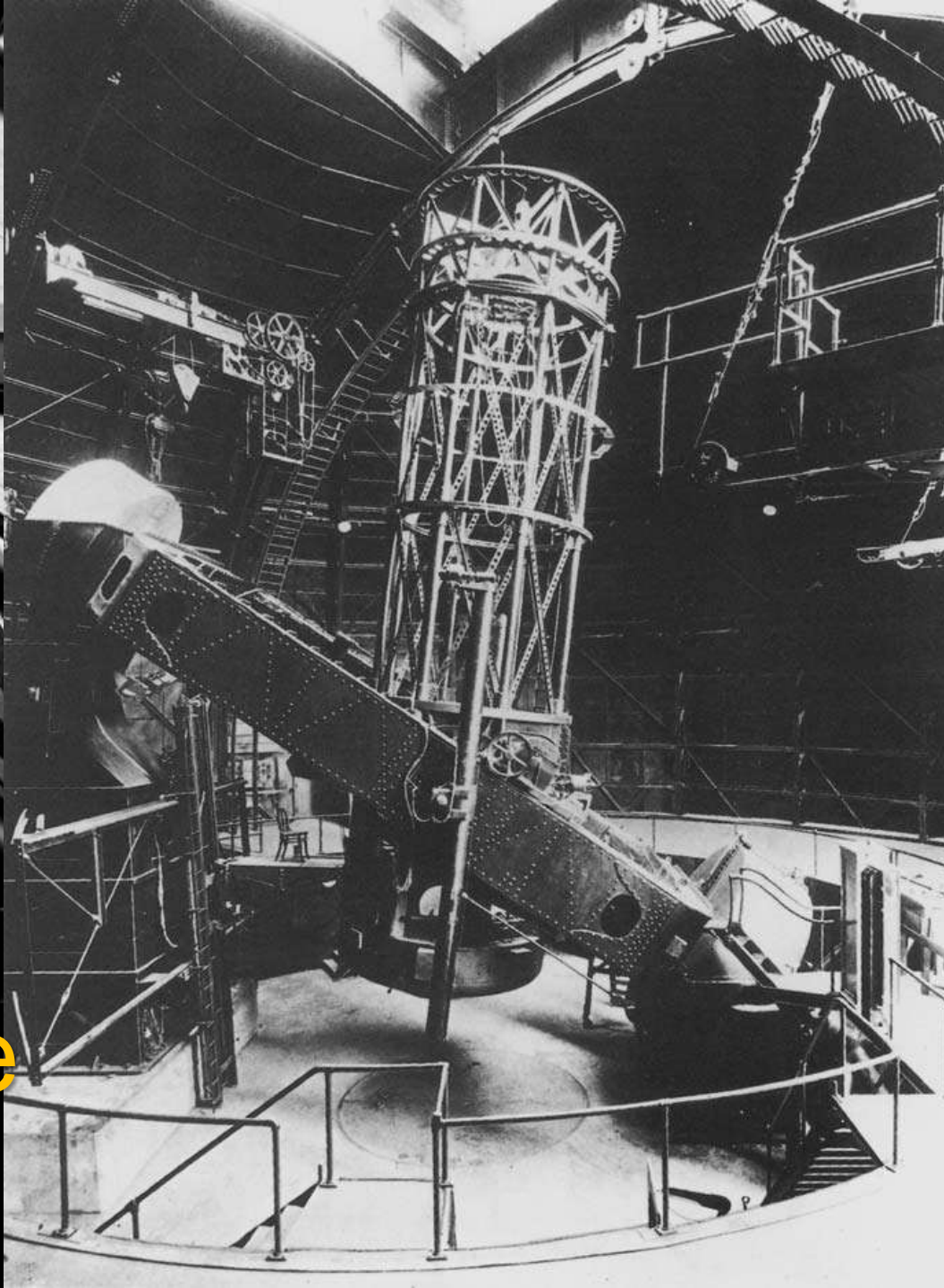
Diagramme de G. Lemaître de 1927 jamais publié



Bruxelles, Octobre 1927

« Vos calculs sont corrects,
mais votre physique est abominable »





Edwin P. Hubble
1889 – 1953

1929 - E. Hubble publie sa Loi

*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

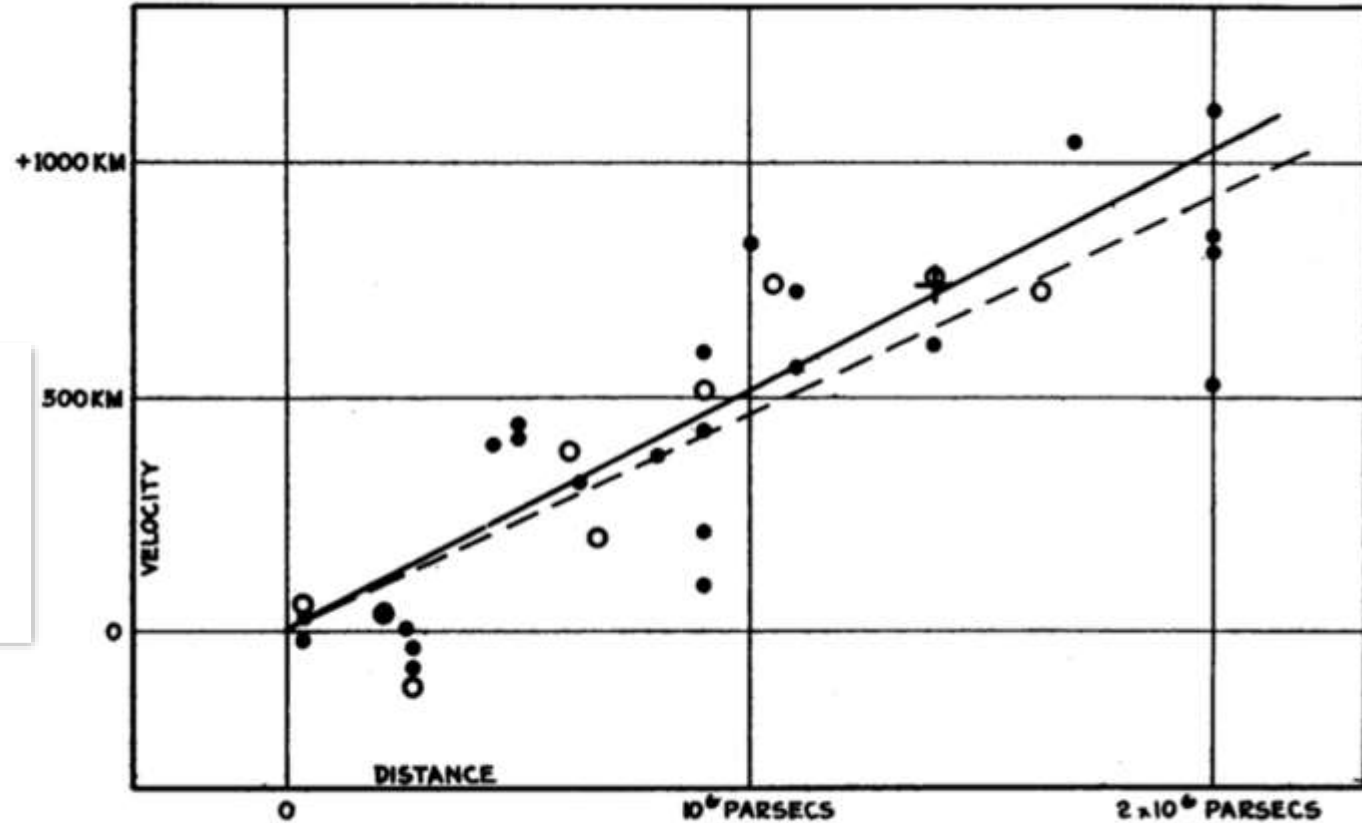


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Nouvelle estimation de H_0 par H.P. Hubble ≈ 500 km/s/Mpc

LES PROBLÈMES DE LA PHILOSOPHIE DES SCIENCES

1931 – George Lemaître publie

**L'HYPOTHÈSE
DE L'ATOME PRIMITIF**

ESSAI DE COSMOGONIE

PAR

GEORGES LEMAÎTRE

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN

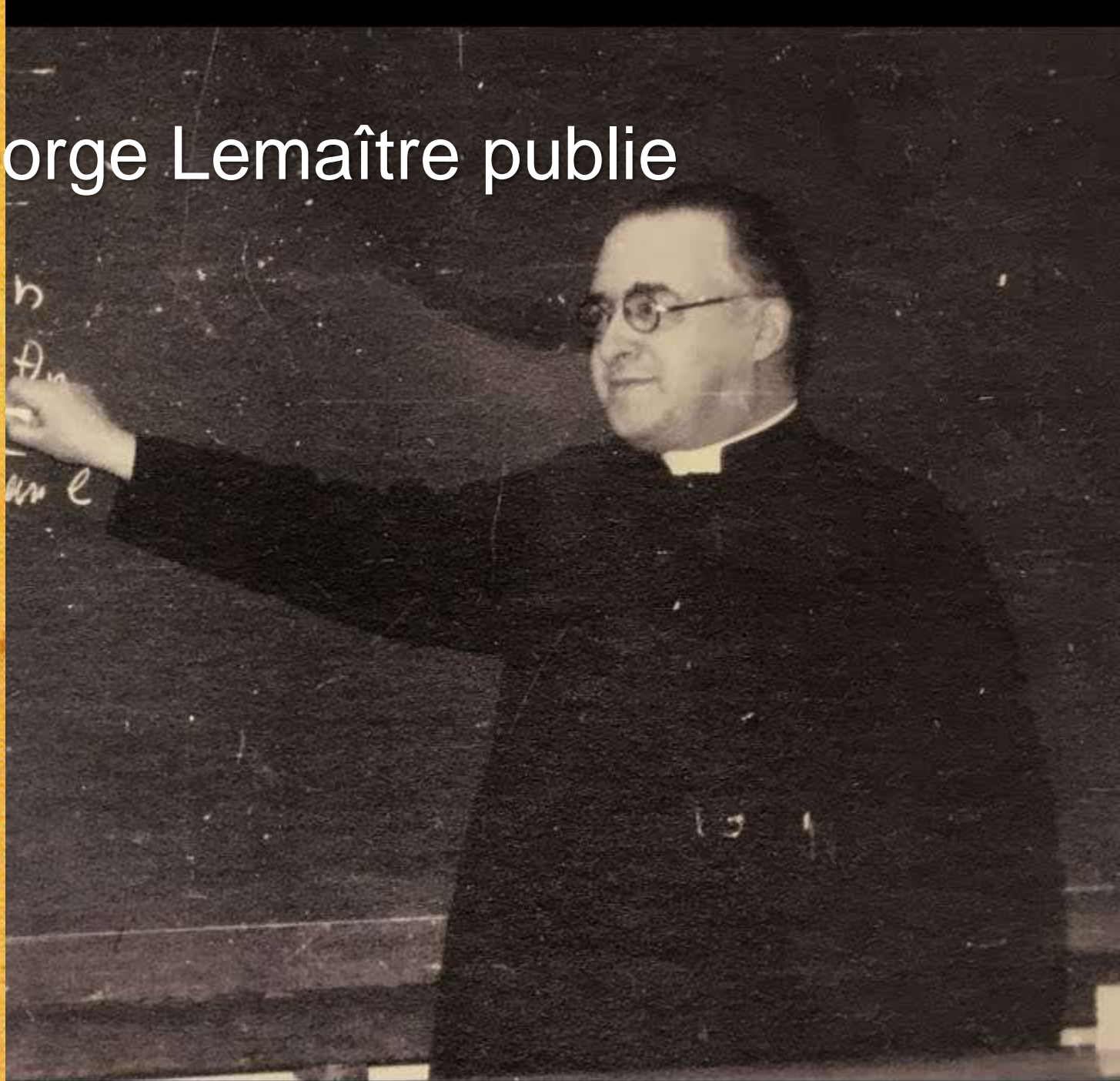
PRÉFACE DE FERDINAND GONSETH

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE

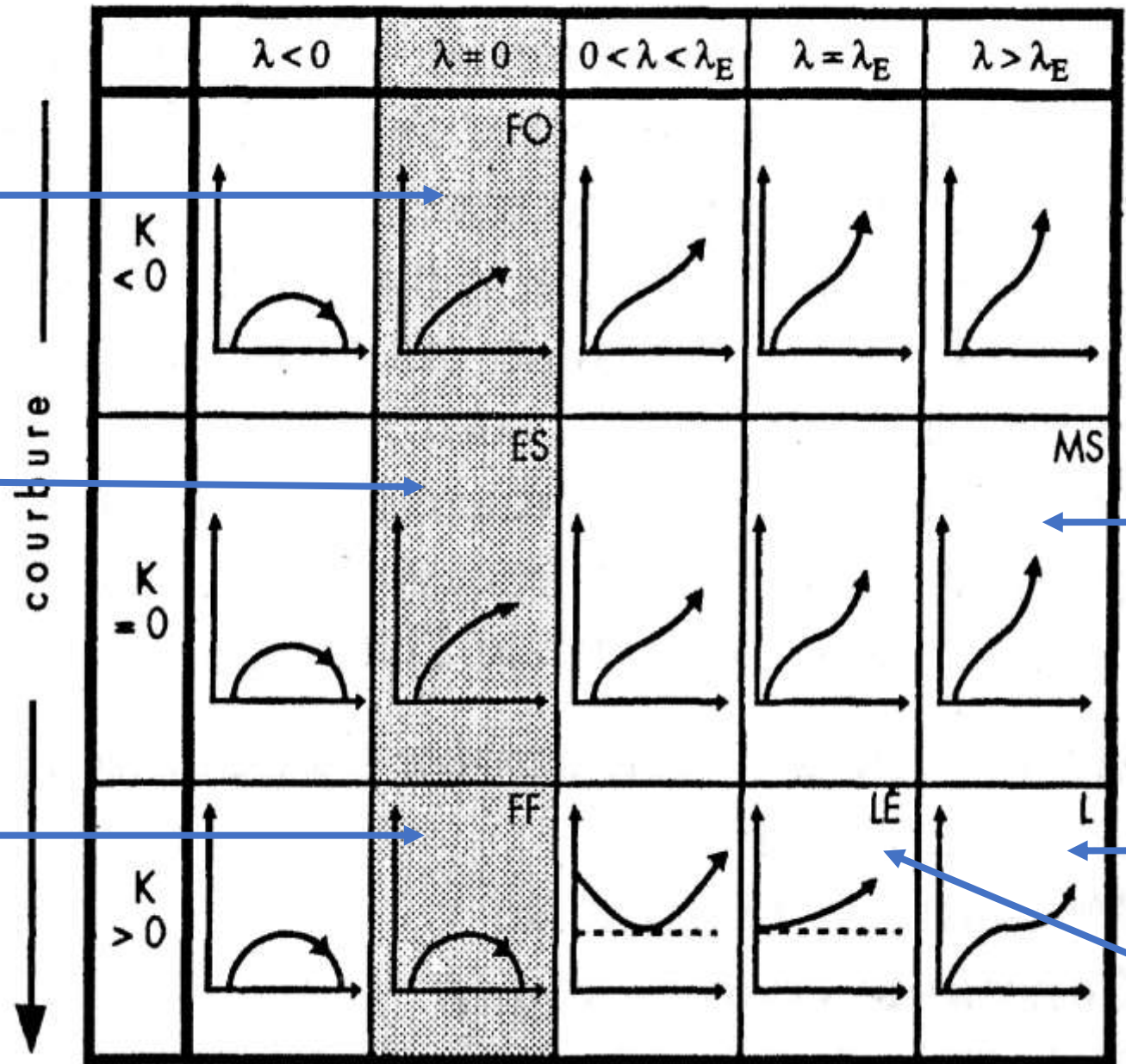


NEUCHÂTEL
ÉDITIONS DU GRIFFON

BRUXELLES
ÉDITIONS HERMÈS



constante cosmologique →



Friedmann ouvert
1924

Einstein - De Sitter
1932

Friedmann fermé
1922

Modèle « standard »
 Λ CDM

Lemaître « hésitant »
1931

Lemaître-Eddington
1927

1933 - Observatoire du Mt Wilson, Californie



« En janvier 1933, à la fin de l'exposé de Lemaître à l'observatoire du Mont Wilson, en Californie, Einstein se lève, applaudit et lance qu'il s'agit là de la plus satisfaisante de toutes les explications de la création qu'il ait jamais entendues »

A black and white close-up portrait of a man with glasses, looking slightly to the right. The image is the background for the text overlay.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

1948 – G. Gamov, Alpher & Herman
théorisent la Nucléosynthèse Primordiale
& le Fond Diffus Cosmologique

A black and white portrait of Fred Hoyle, an elderly man with glasses, looking slightly to the left. The background is dark and out of focus.

1949 – Fred Hoyle lance l'expression « Big Bang » à la BBC

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

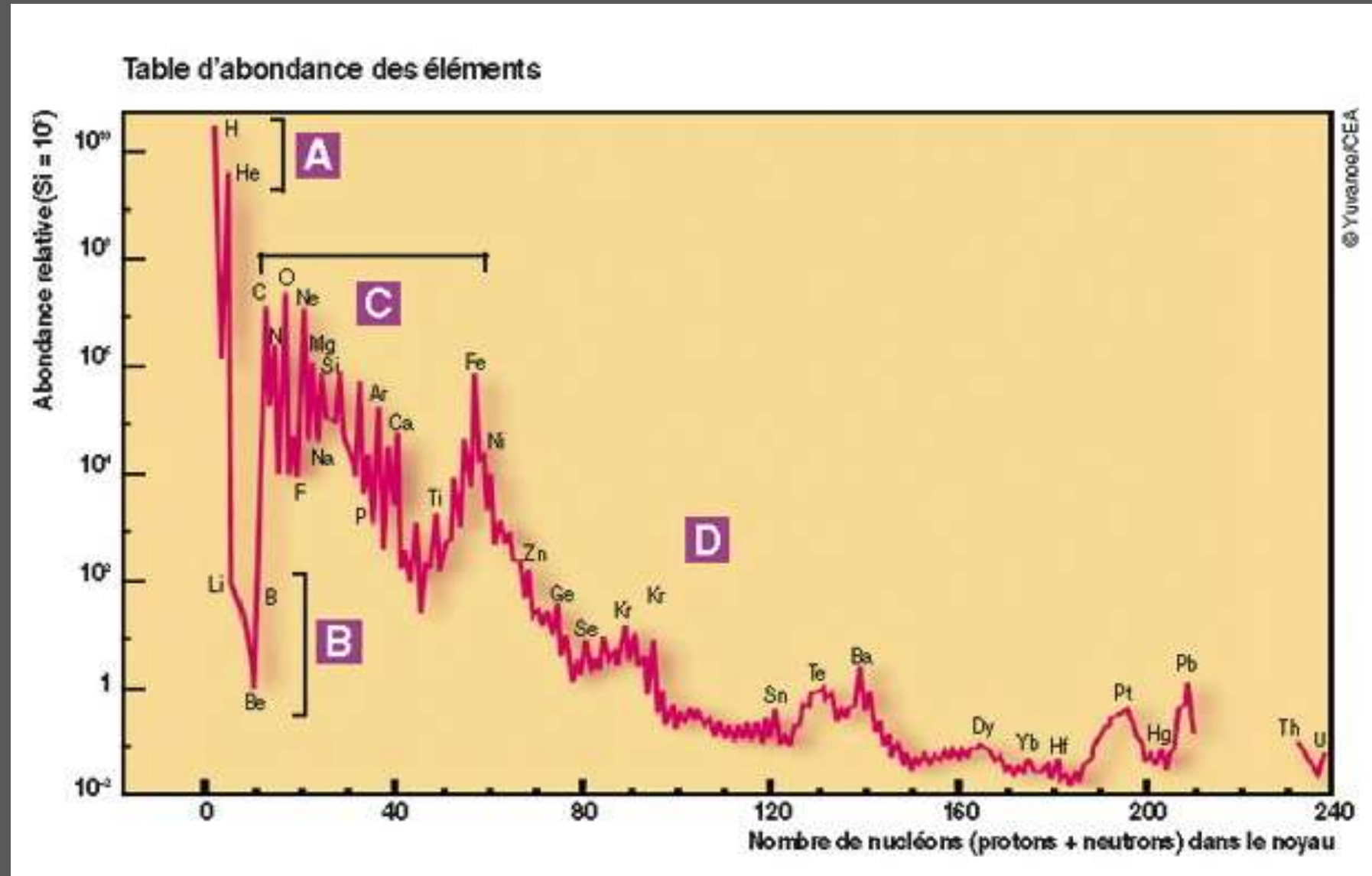
*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;
(King Lear, Act IV, Scene 3)

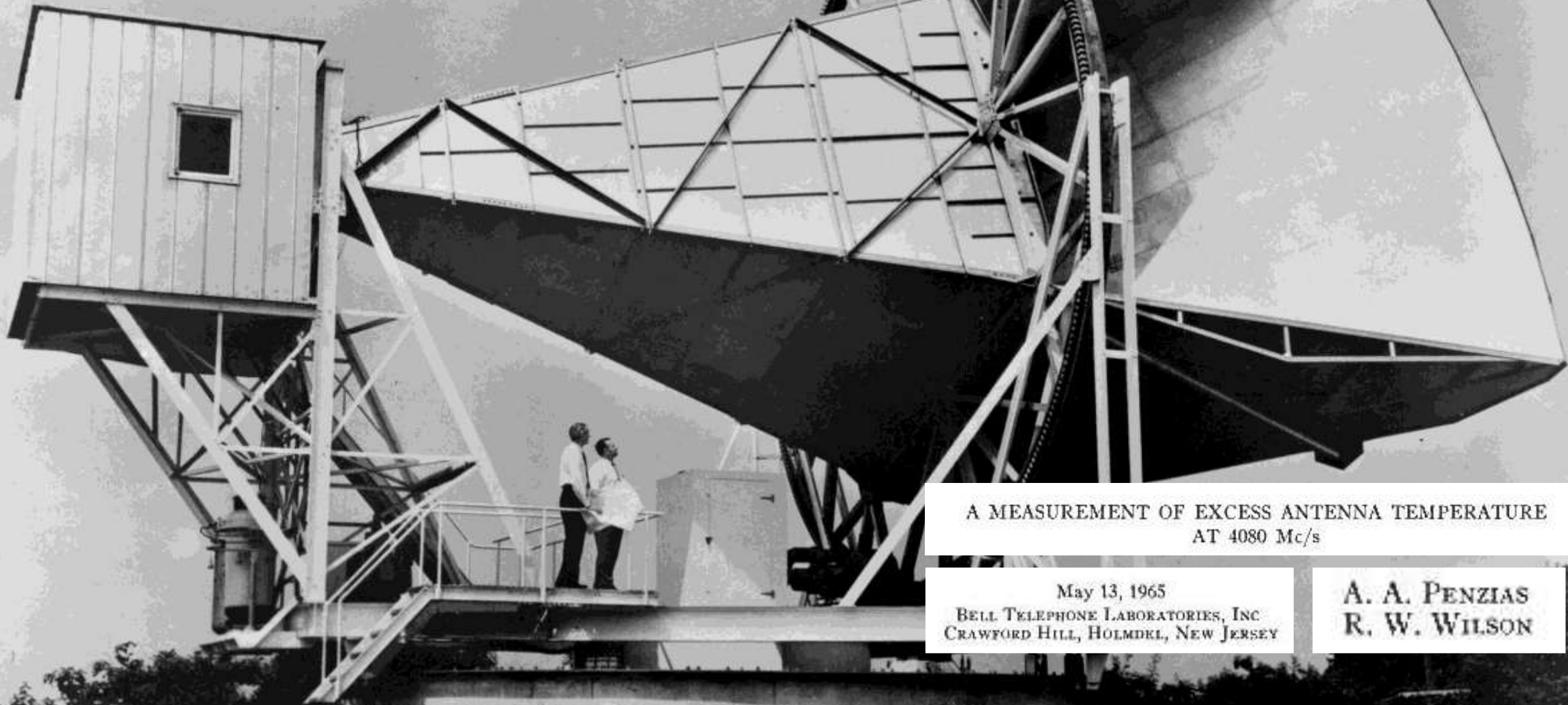
but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”
(Julius Caesar, Act I, Scene 2)

Abondance des éléments dans l'Univers



1964 – Arno Penzias & Robert Wilson captent le bruit de fond du Cosmos



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE
AT 4080 Mc/s

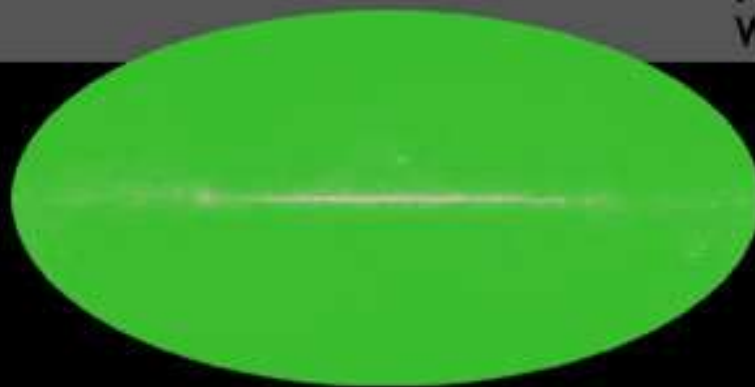
May 13, 1965
BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

1965



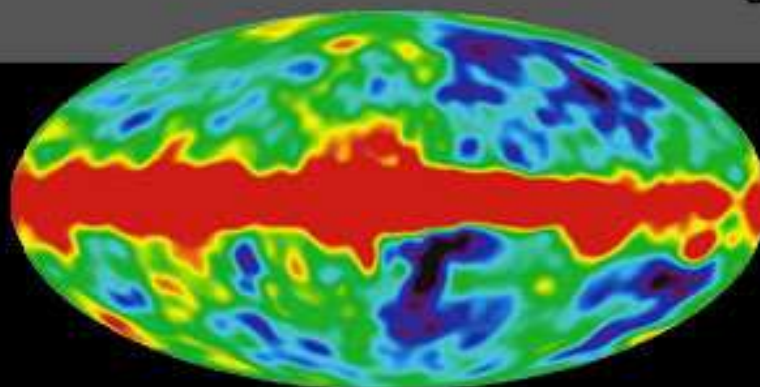
Penzias and
Wilson



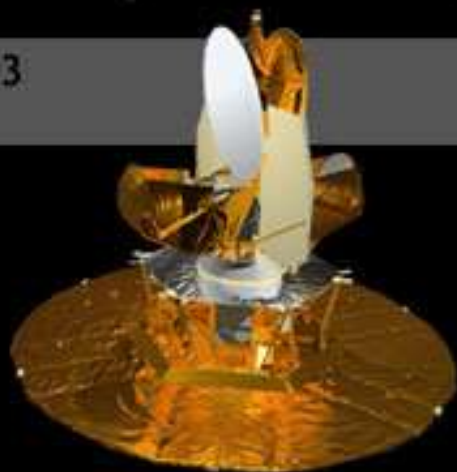
1992



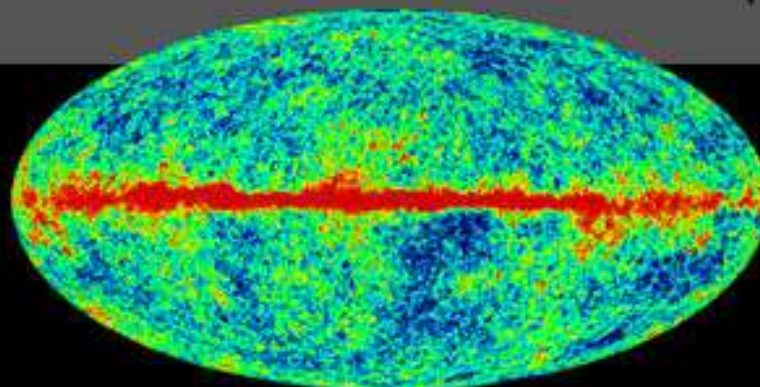
COBE



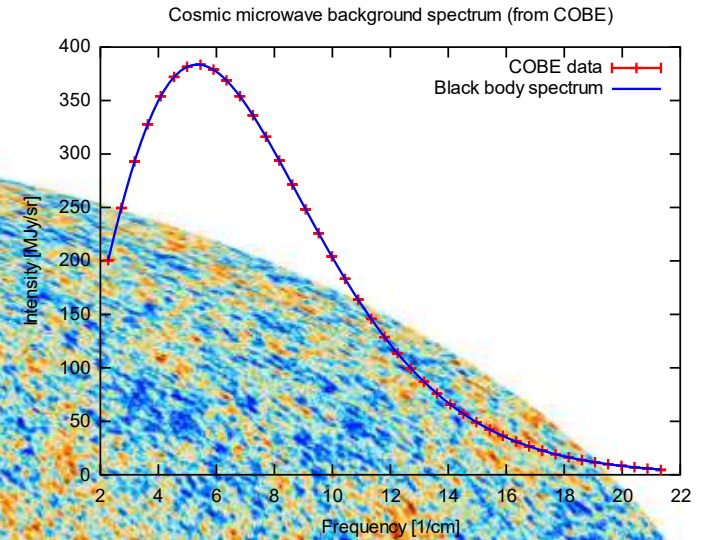
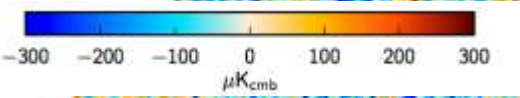
2003



WMAP



Planck 2009-2013



Fluctuations d'amplitude de 1/100,000

Température $2,728 \pm 0,002$ K

Compensé du déplacement de la Terre, Soleil & Voie Lactée
de 369.82 ± 0.11 km/s en direction de la constellation du Lion



10 October 2003
ISSN 0028-0836
Volume 425, Number 7000

nature

Is this the shape
of the Universe?

Nobel news
This year's winners

Memory
Upays to see you

Force of destiny
Astronomical
technology

www.nature.com

An analysis of astronomical data suggests not only that the Universe is finite, but also that it has a specific, rather rigid topology. If confirmed, this is a major discovery about the nature of the Universe.

What shape is space? On page 593 of this issue, *Luminet et al.* suggest that the topology of the Universe may be a '**Poincaré dodecahedral space**' — as illustrated on this week's cover.

Luminet, JP., Weeks, J., Riazuelo, A. *et al*
Nature **425**, 593–595 (2003).

<https://doi.org/10.1038/nature01944>



Brian P. Schmidt

Supernova Cosmology Project

Saul Perlmutter

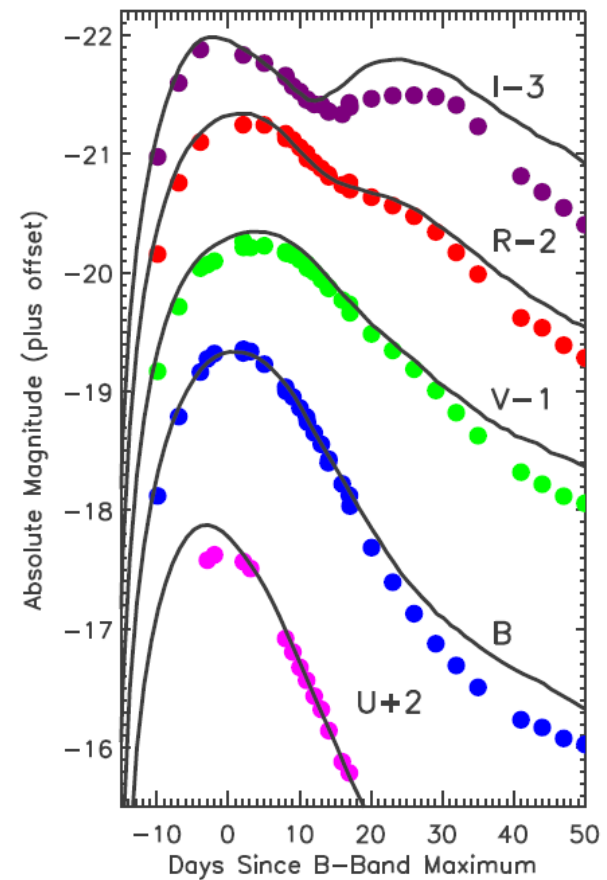
High-Z Supernovæ Search Team

Adam G. Riess

1998 - L'Expansion de l'Univers s'accélère !

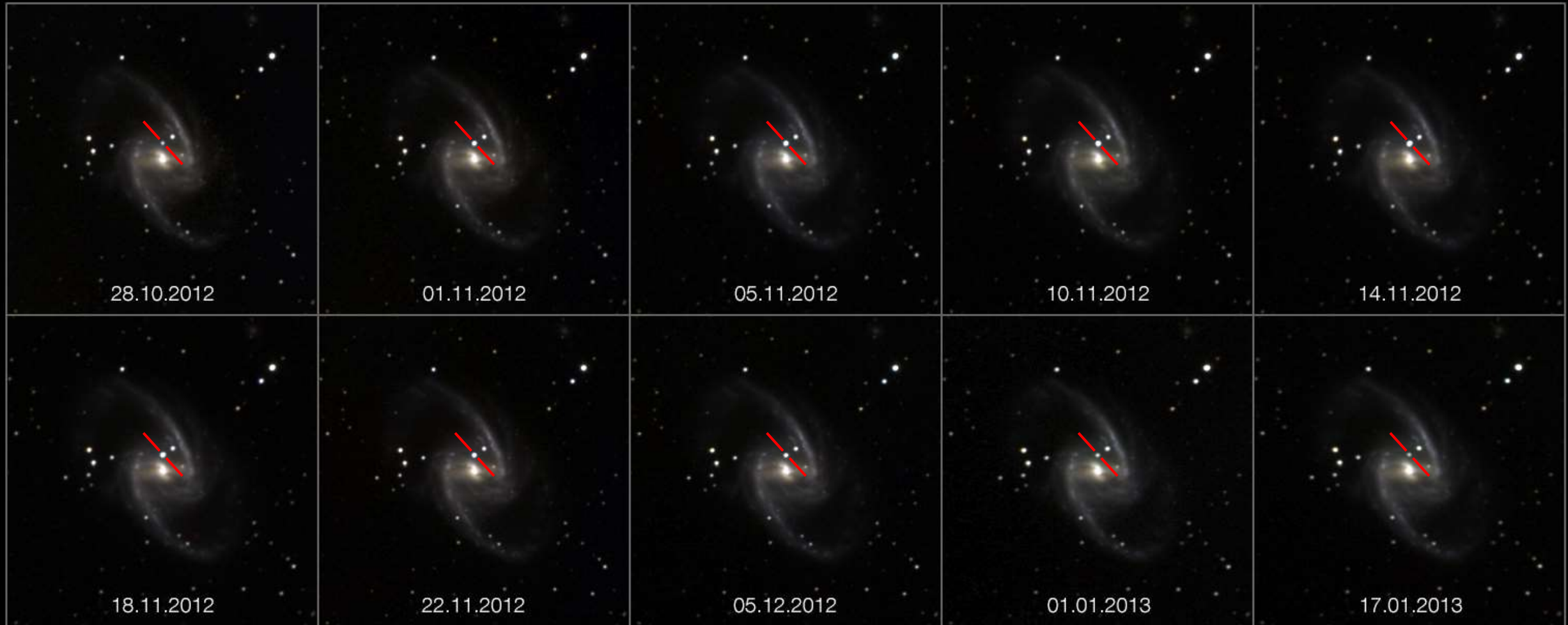
Explosions de supernovæ de type Ia

Adam G. Riess & al. – December 2021



Pseudo-color HST images of 35 supernovæ Ia in their hosts galaxies

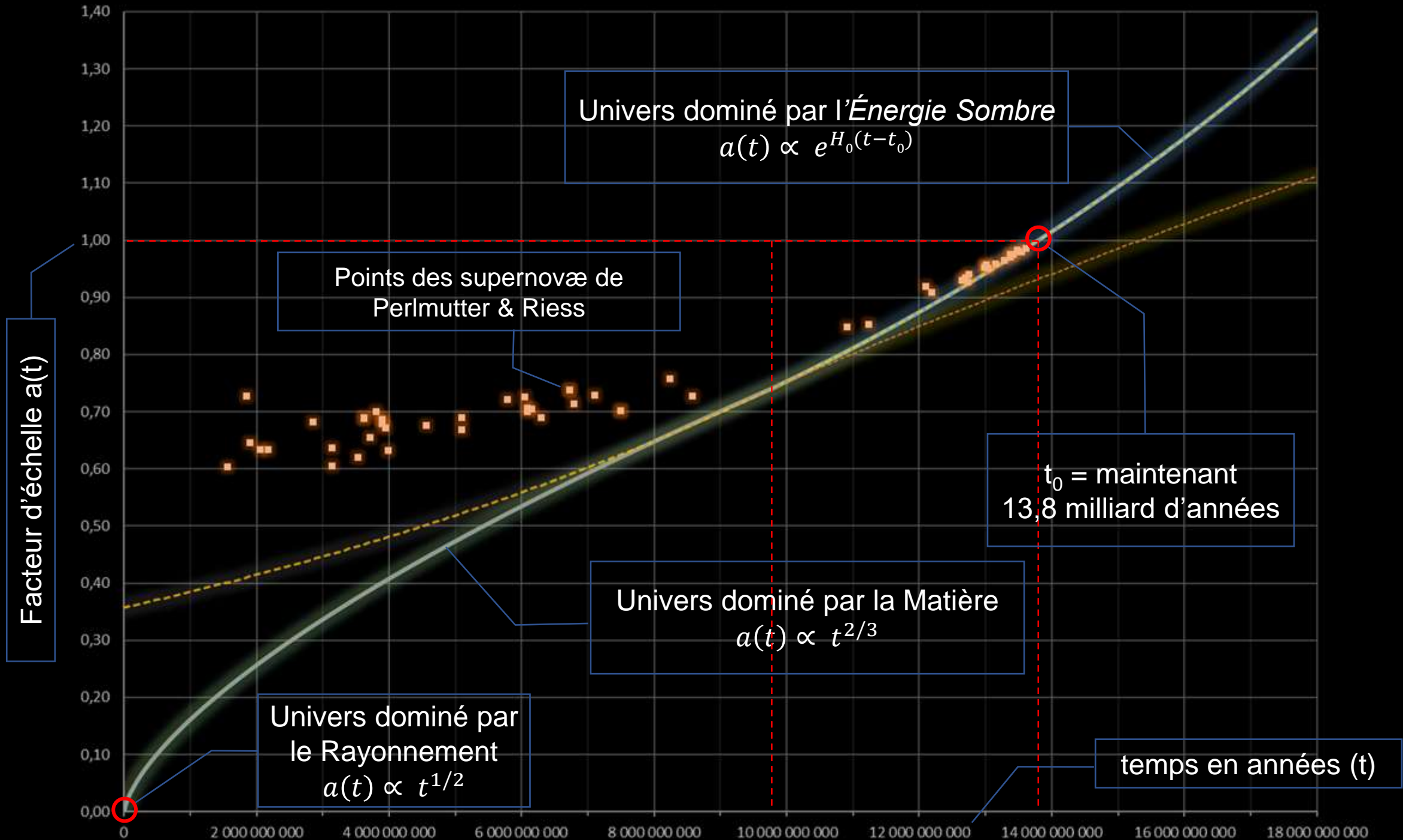
Explosion d'une SN Ia dans NGC 1365

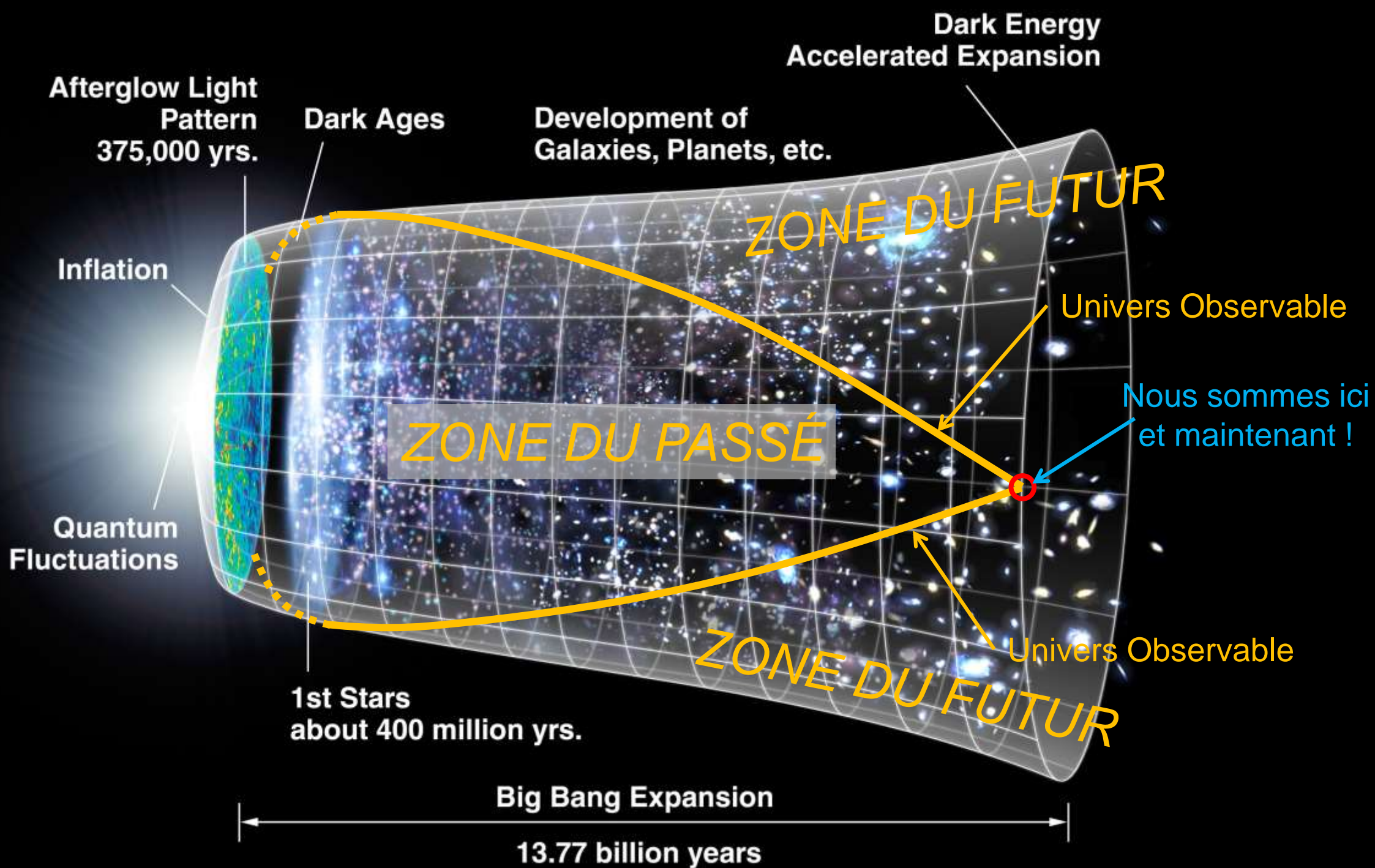


Supernova SN2020jfo dans M61

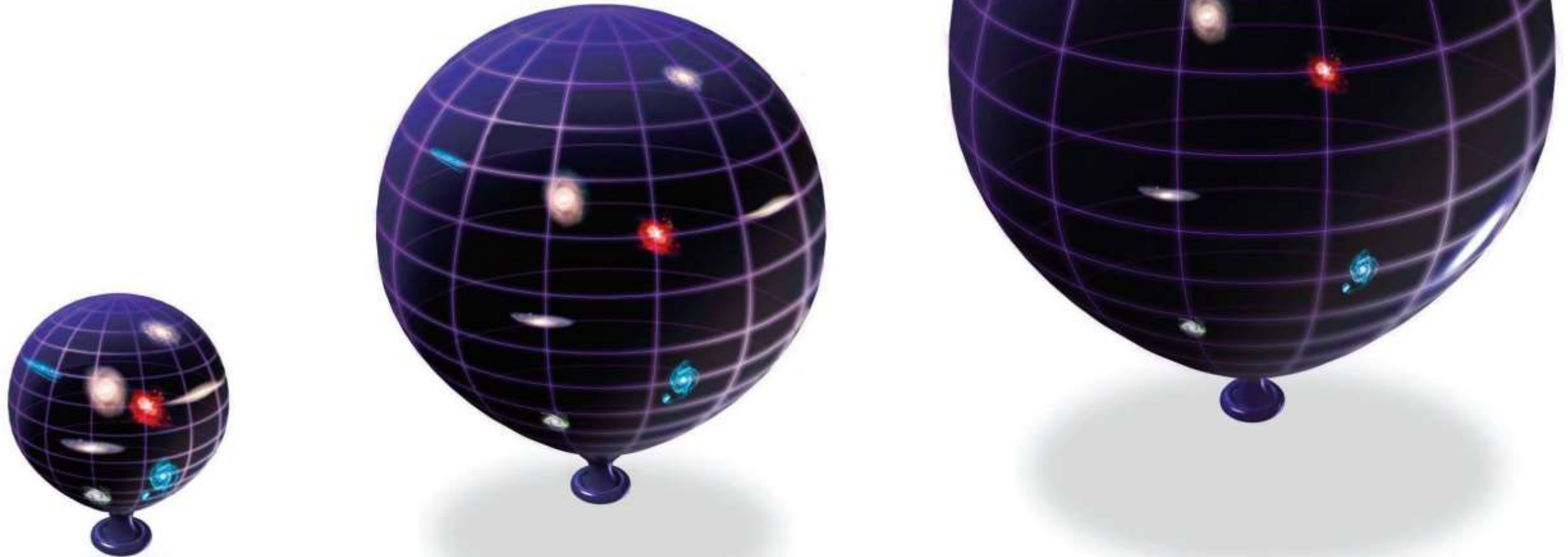



Galaxie Spirale SB (magnitude 13,9) prise le
19 mai 2020 avec un télescope de \varnothing 400mm



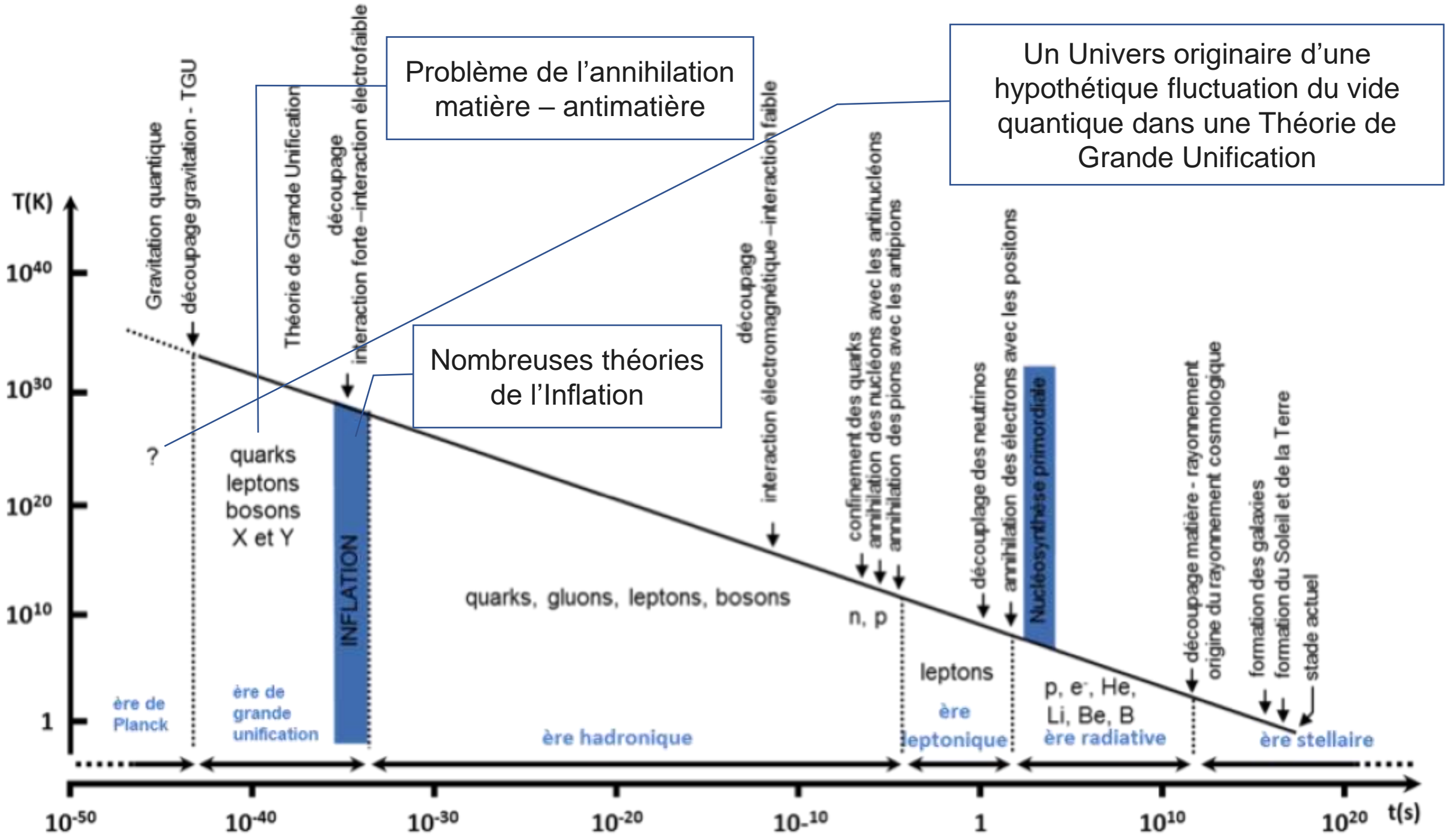


L'expansion d'un Univers à 2 dimensions spatiales





Depuis 1990, les nuages s'accumulent
dans le ciel du Big Bang...



Problème de l'annihilation matière - antimatière

Nombreuses théories de l'Inflation

Un Univers originaire d'une hypothétique fluctuation du vide quantique dans une Théorie de Grande Unification

Gravitation quantique
 découpage gravitation - TGU

Théorie de Grande Unification

découpage interaction forte - interaction électrofaible

découpage interaction électromagnétique - interaction faible

confinement des quarks
 annihilation des nucléons avec les antinucléons
 annihilation des pions avec les antipions

découpage des neutrinos
 annihilation des électrons avec les positrons

Nucleosynthese primordiale

découpage matière - rayonnement
 origine du rayonnement cosmologique

formation des galaxies
 formation du Soleil et de la Terre

stade actuel

quarks
 leptons
 bosons
 X et Y

quarks, gluons, leptons, bosons

n, p

leptons
 ère leptonique

p, e⁻, He,
 Li, Be, B
 ère radiative

ère stellaire

ère de Planck

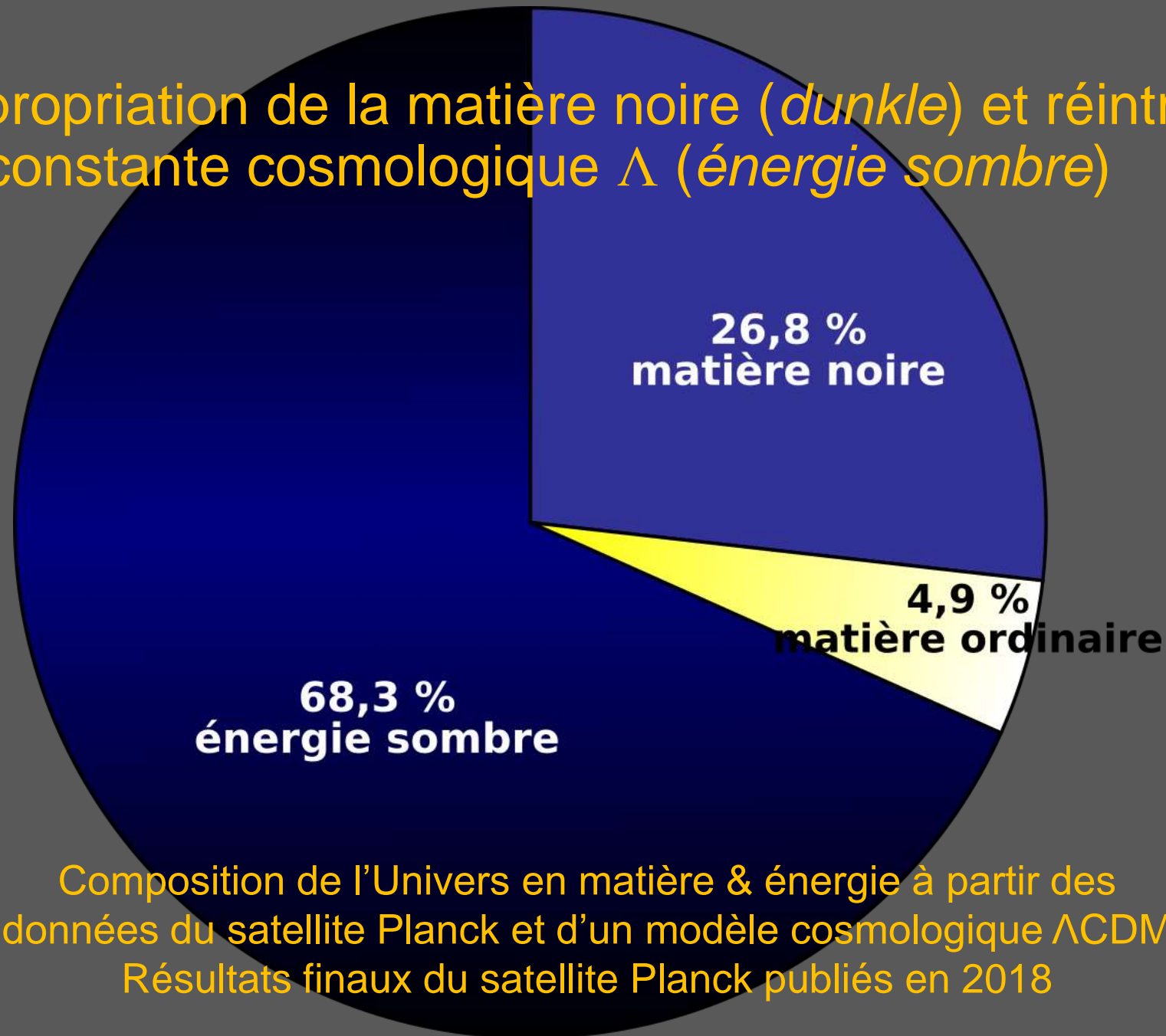
ère de grande unification

ère hadronique

10^{-50} 10^{-40} 10^{-30} 10^{-20} 10^{-10} 1 10^{10} 10^{20} t(s)

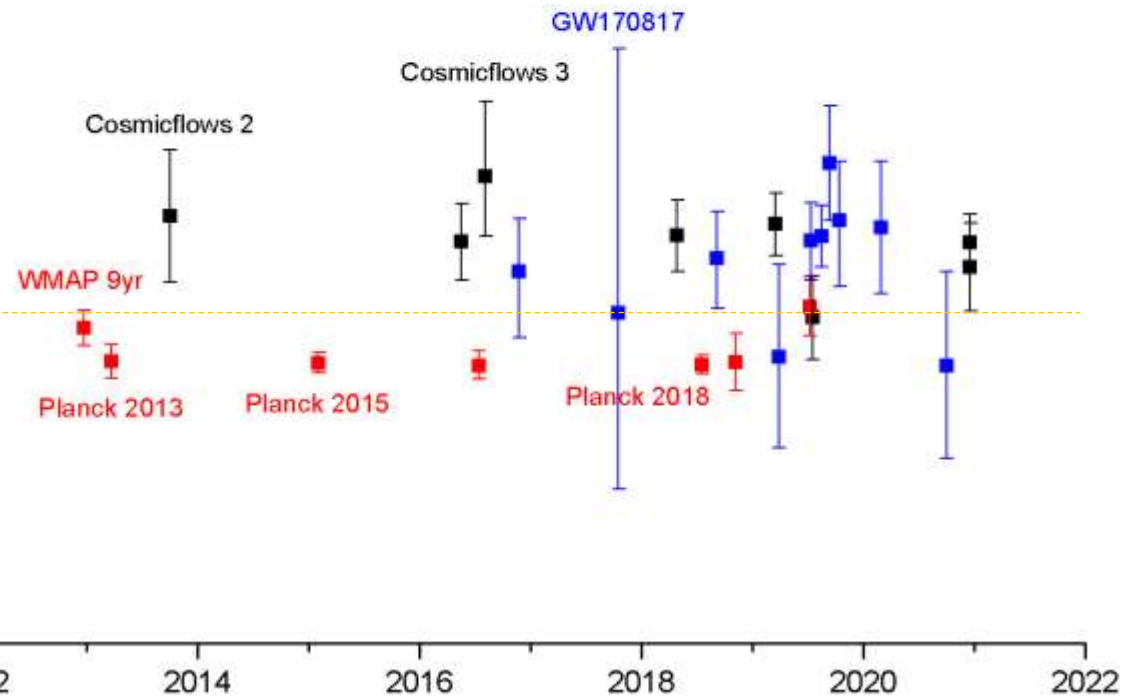
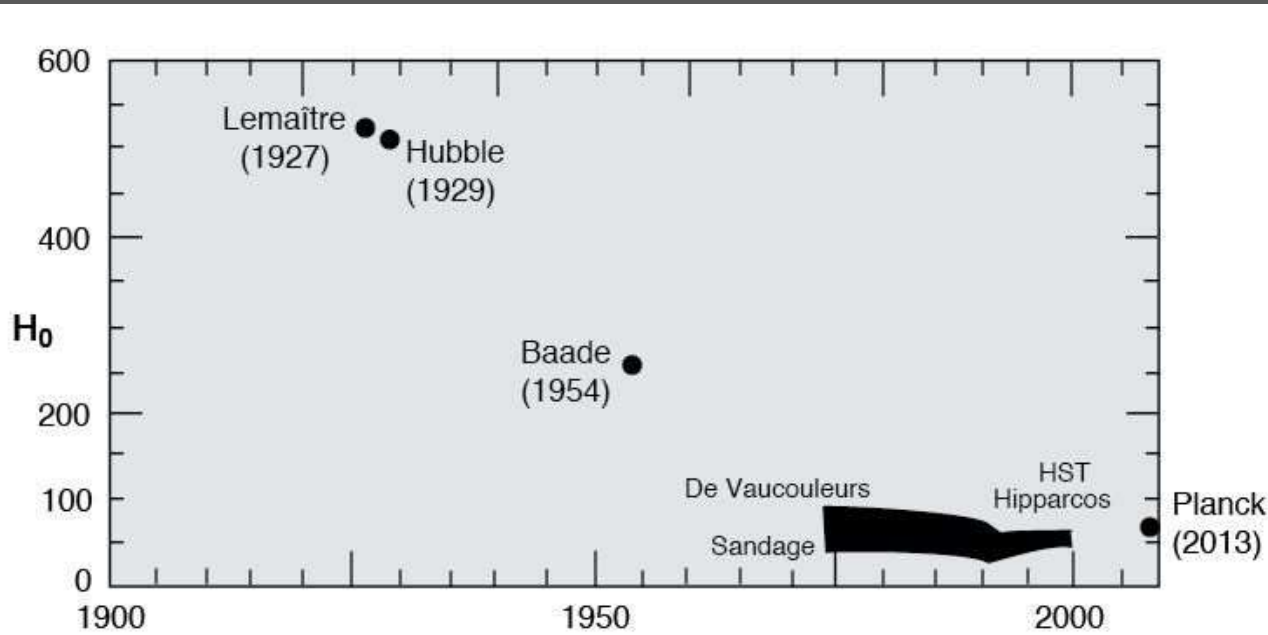
T(K)
 10^{40}
 10^{30}
 10^{20}
 10^{10}
 1

☁ Réappropriation de la matière noire (*dunkle*) et réintroduction de la constante cosmologique Λ (*énergie sombre*)



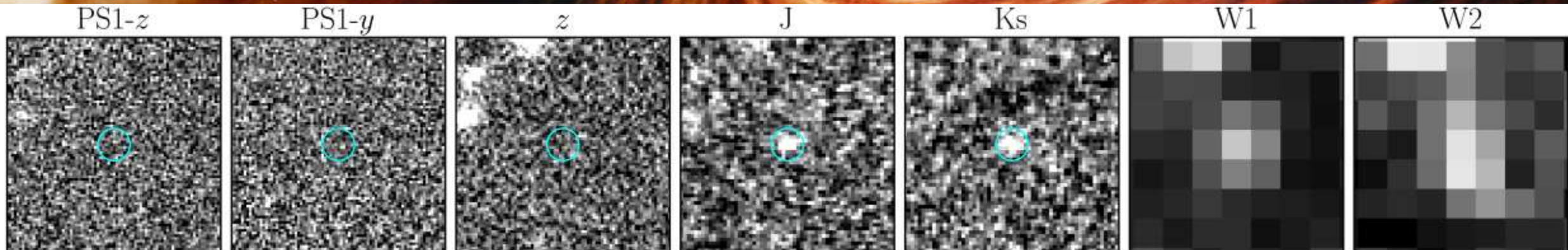
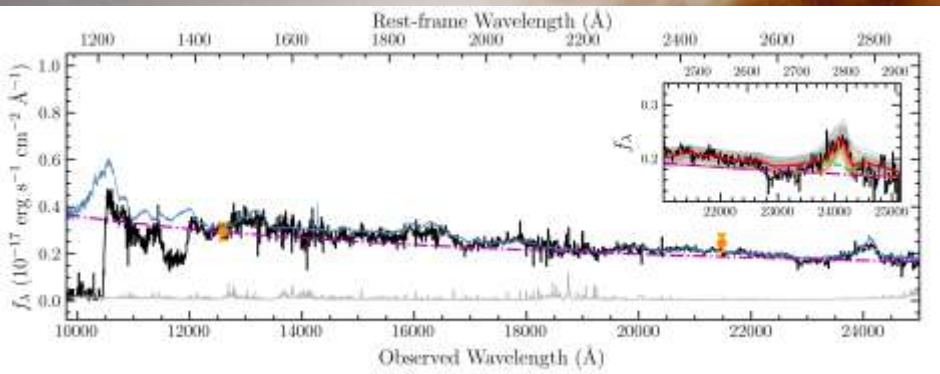


Tension dans la détermination de la « constante » de Hubble



☁ Trou noir super massif bien trop tôt...

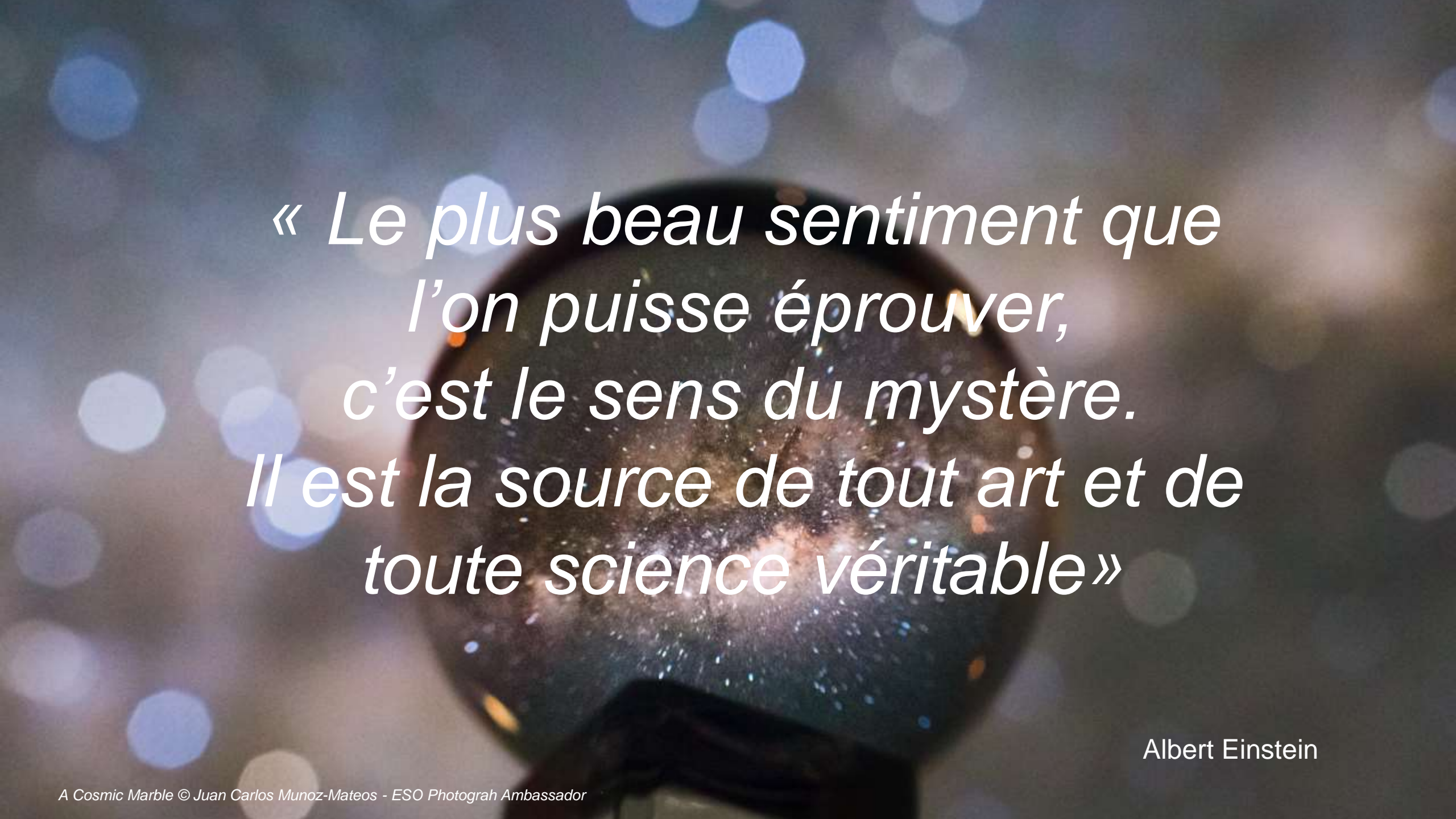
J0313–1806 est le quasar connu le plus lointain
 $z = 7.64$ ou ~ 670 million d'années après le Big Bang
Découvert en Janvier 2021
Contient un trou noir supermassif de $1.6 \pm 0.4 \times 10^9$ masse solaire





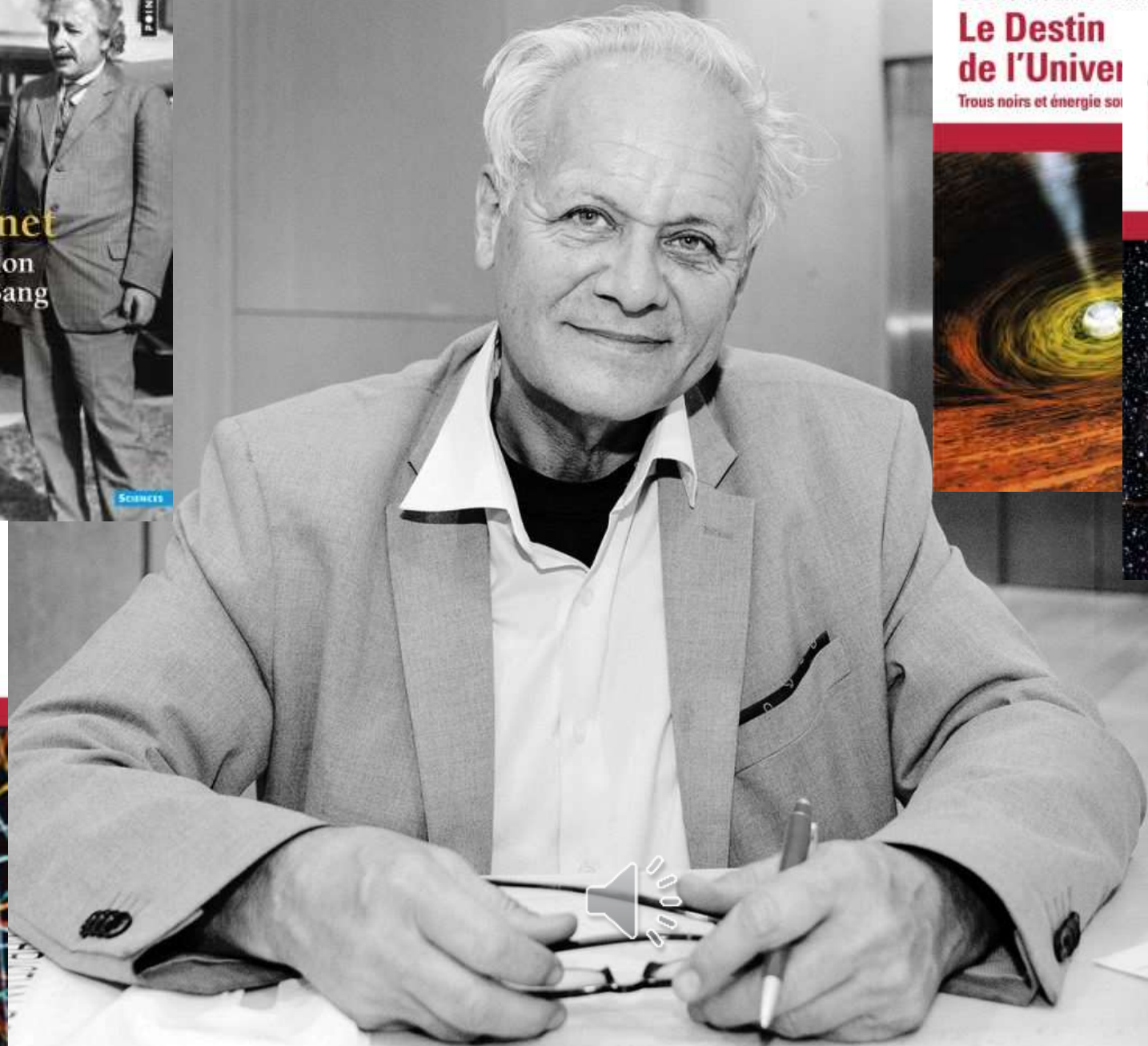
Une nouvelle cosmologie,
mission impossible pour le JWST ?



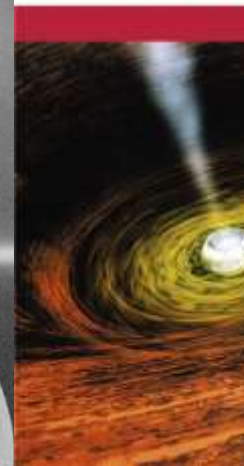
A cosmic marble containing a galaxy, set against a background of bokeh lights.

*« Le plus beau sentiment que
l'on puisse éprouver,
c'est le sens du mystère.
Il est la source de tout art et de
toute science véritable »*

Albert Einstein



Jean-Pierre Luminet
**Le Destin
de l'Univers**
Trous noirs et énergie so



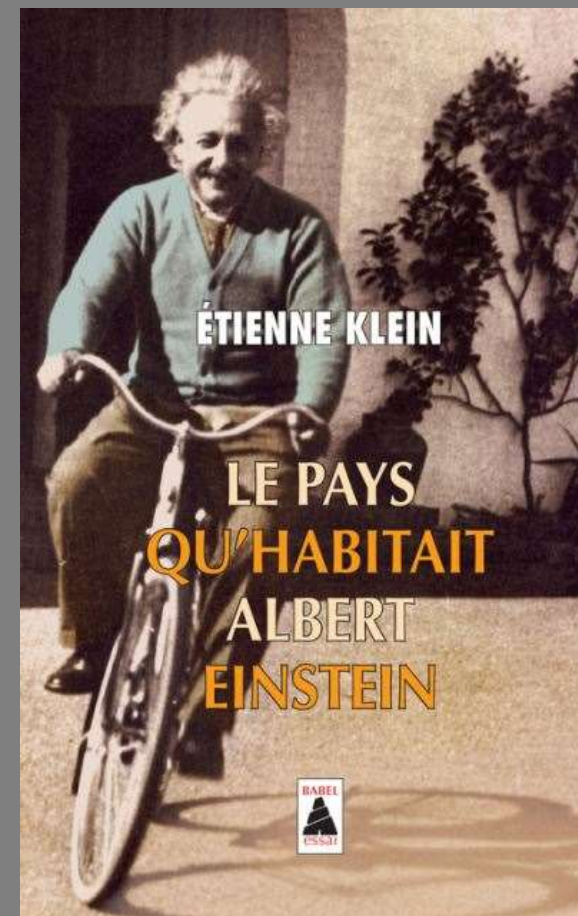
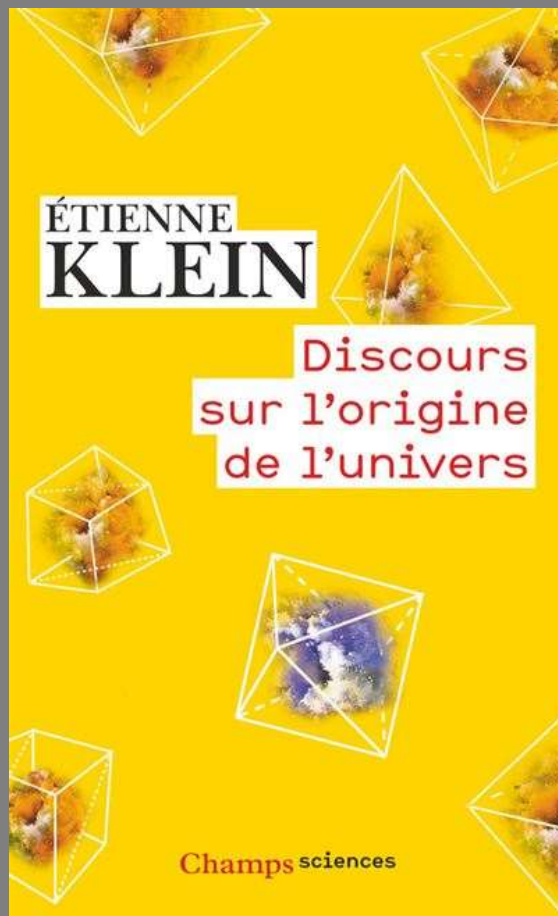
Jean-Pierre Luminet
**Le Destin
de l'Univers, II**
Trous noirs et énergie sombre



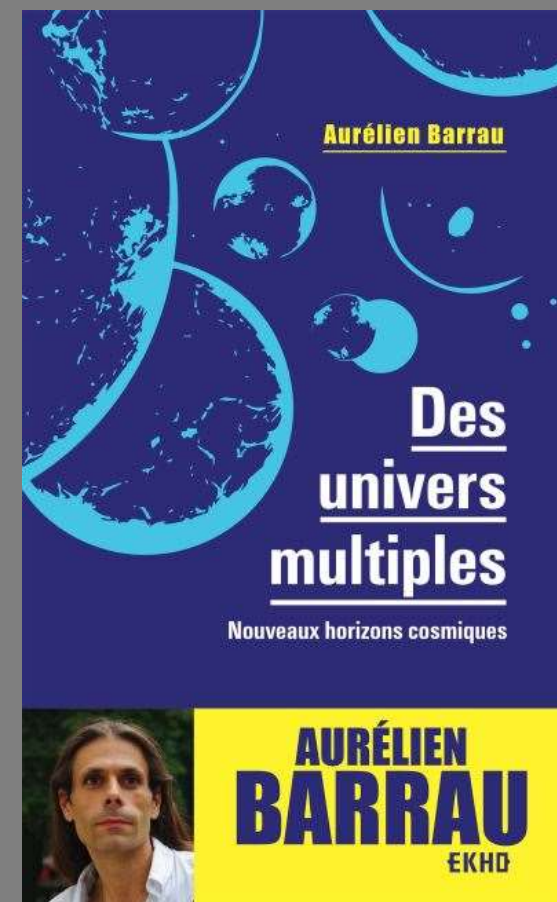
Pour en savoir plus...



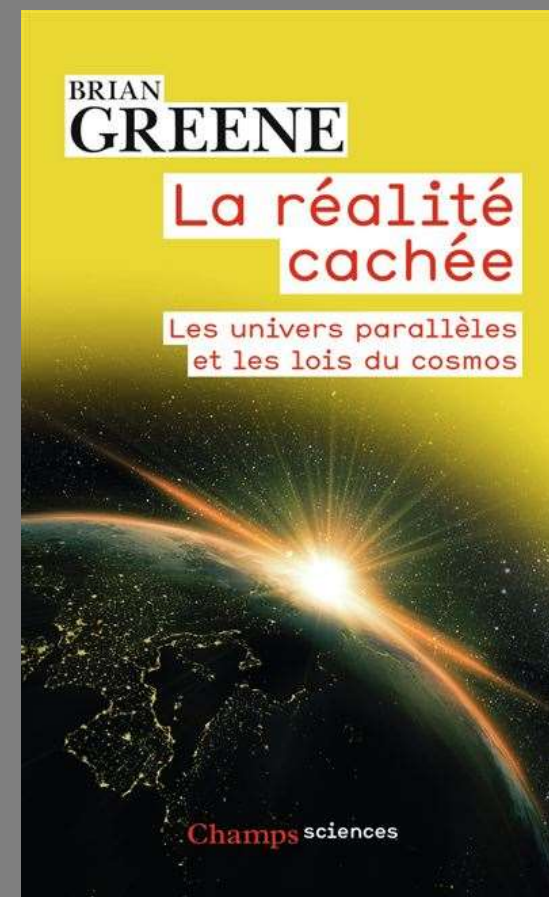
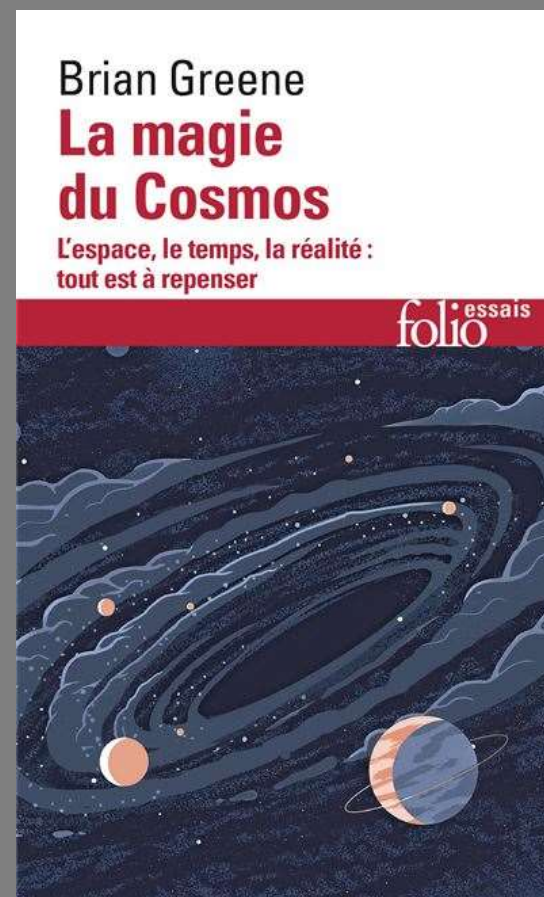
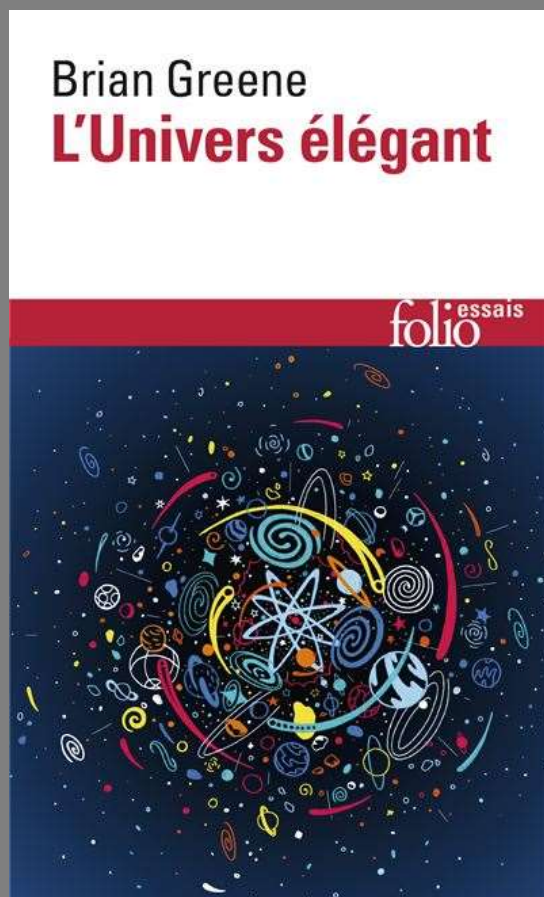
Pour en savoir plus...



Pour en savoir plus...



Pour en savoir plus...



<https://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

Welcome to Ned Wright's Cosmology Tutorial

[News of the Universe](#)

[Frequently Asked Questions](#)

[Enter the tutorial](#) or the [Italian version](#)  or the [French version](#) 

[Cosmological fads and fallacies](#)

 [Cosmology and art](#)

[CMB Spectrum](#)

[CMB Anisotropy](#)

[Big Bang Nucleosynthesis](#)

[Supernova Observations](#)

[Cosmology, Religion & Kansas](#)

[Send me your comments](#)

New on the tutorial:

- A [discussion](#) of the history of the CMB dipole discovery.
- A [history of COBE](#), the COsmic Background Explorer, in pictures.
- A cool [rollover page](#) that blinks between a color image constructed from 3 WMAP bands and the WMAP ILC reduced galaxy map
- A [calculator](#) that takes light travel time and computes the [redshift](#). There is also an [advanced version](#) of my [Cosmology Calculator](#).

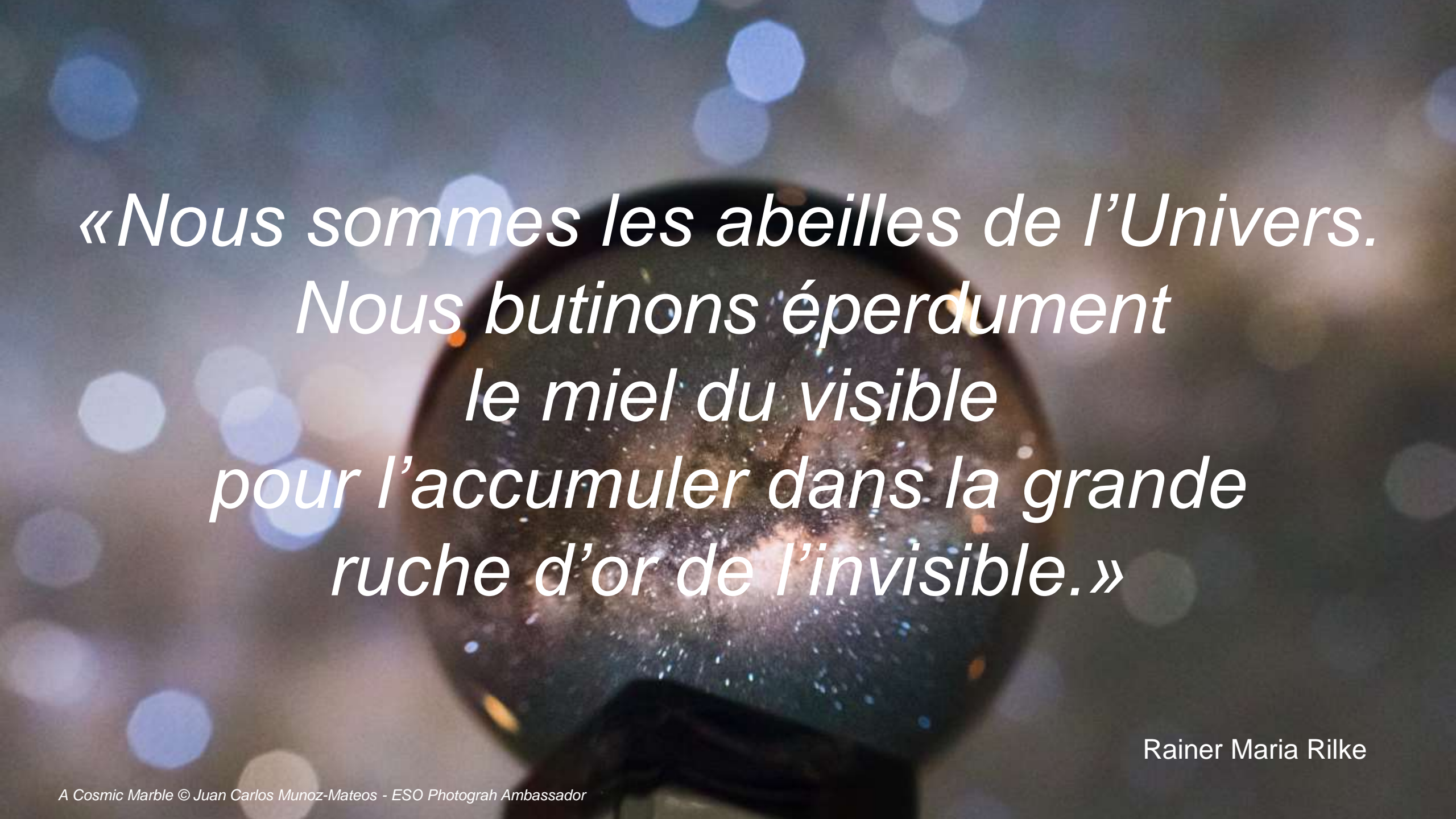
Cosmology is the study of the origin, current state, and future of our Universe. This field has been revolutionized by many discoveries made during the past century. My cosmology tutorial is an attempt to summarize these discoveries. It will be "under construction" for the foreseeable future as new discoveries are made. I will attempt to keep these pages up-to-date as a resource for the cosmology courses I teach at UCLA. The tutorial is completely non-commercial, but [tax deductible donations](#) to UCLA are always welcome.

Astronomy and cosmology are very much mathematical sciences, but I have attempted to avoid higher math in these pages. I do use high school algebra and geometry - courses required for admission to UCLA - but I have also included some animations [[1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#)], some Java applets [[1](#), [2](#)], and many illustrations in the tutorials, the [ABC's of Distances](#), and the answers to some of the [Frequently Asked Questions](#).

In addition to the [cosmology tutorial](#), there is also a [relativity tutorial](#) and extensive discussions on the [age](#), [density](#) and [size](#) of the Universe. There is also a [bibliography](#) of books at a range of levels, and a Javascript [calculator](#) of the [many distances](#) involved in cosmology.

Slides for recent talks:





*«Nous sommes les abeilles de l'Univers.
Nous butinons éperdument
le miel du visible
pour l'accumuler dans la grande
ruche d'or de l'invisible.»*

Rainer Maria Rilke