

Enseigner la cosmologie

Josquin Errard

APC/CNRS

“Teaching the Universe”, Paris, January 2023

le projet
POLARBEAR



Université de Paris

Chajnantor Plateau, 5,200m, Atacama desert, Chile. Credits: NHK

Enseigner la cosmologie

- définitions, contexte, Univers local et lointain
- les bases du modèle cosmologique : la relativité Générale
- confirmations du modèle, l'observation du rayonnement fossile
- problèmes soulevés et solutions théoriques : inflation, multivers



Université de Paris

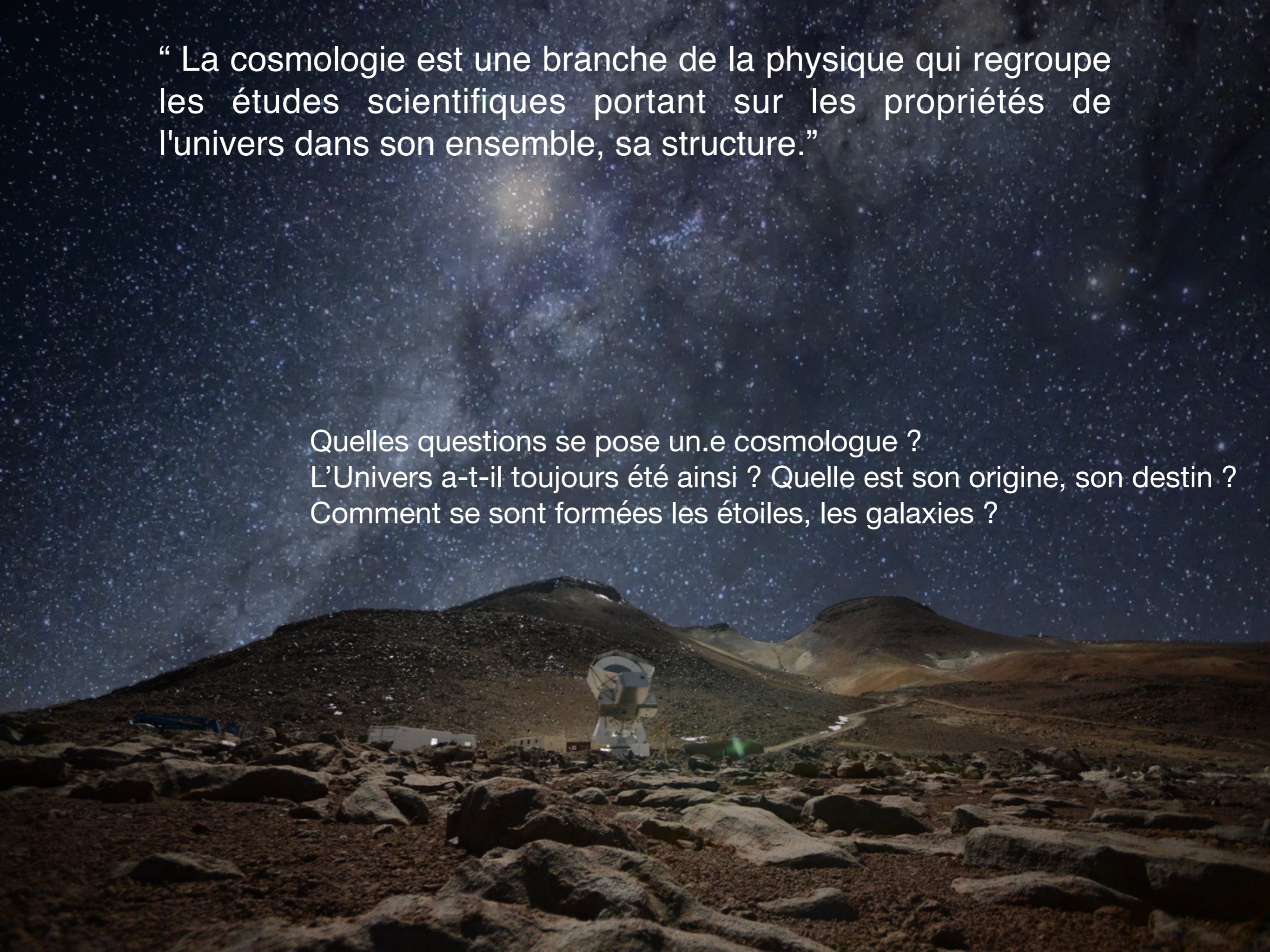
Chajnantor Plateau, 5,200m, Atacama desert, Chile. Credits: NHK

“ La cosmologie est une branche de la physique qui regroupe les études scientifiques portant sur les propriétés de l'univers dans son ensemble, sa structure.”

Quelles questions se pose un.e cosmologue ?

L'Univers a-t-il toujours été ainsi ? Quelle est son origine, son destin ?

Comment se sont formées les étoiles, les galaxies ?



Quelques observations de notre environnement (spatial)

écliptique

Jupiter

Mars

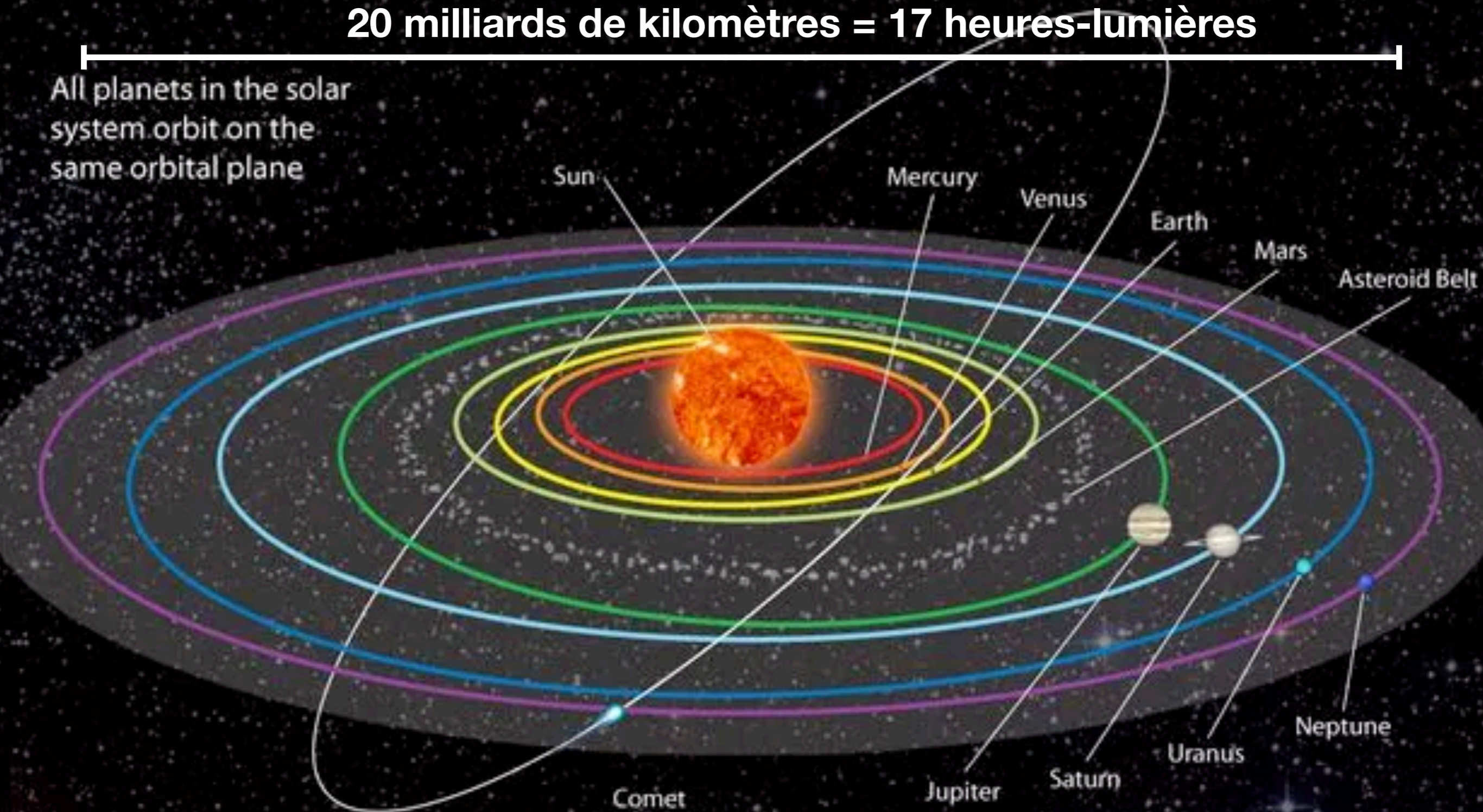
Venus

Quelques observations de notre environnement (spatial)

Orbital Plane

20 milliards de kilomètres = 17 heures-lumières

All planets in the solar system orbit on the same orbital plane



* Many comets exist outside the orbital plane

Quelques observations de notre environnement (spatial)

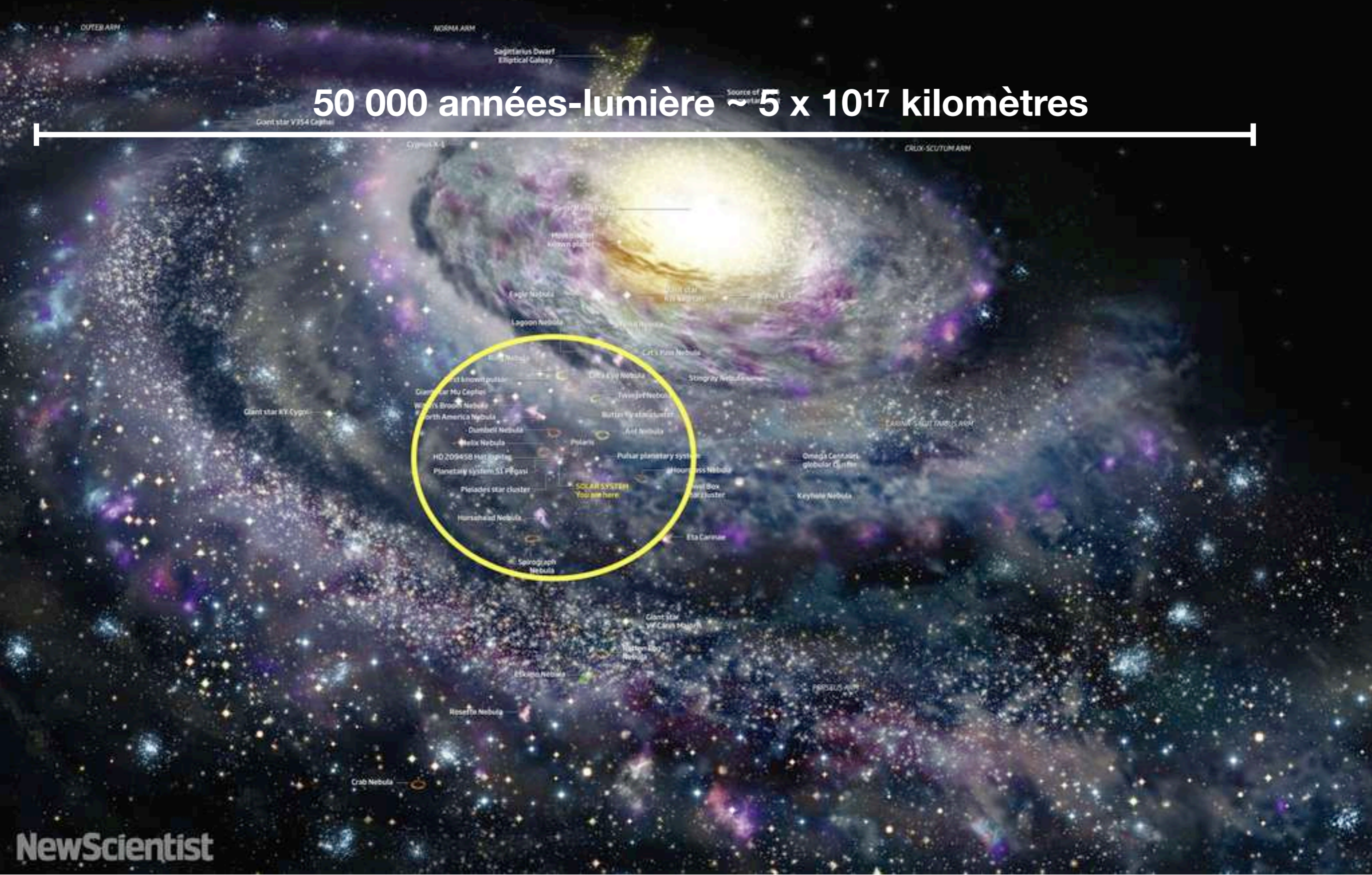
Quelques observations de notre environnement (spatial)



Quelques observations de notre environnement (spatial)

3 à 400 milliards d'étoiles dans la voie lactée ...

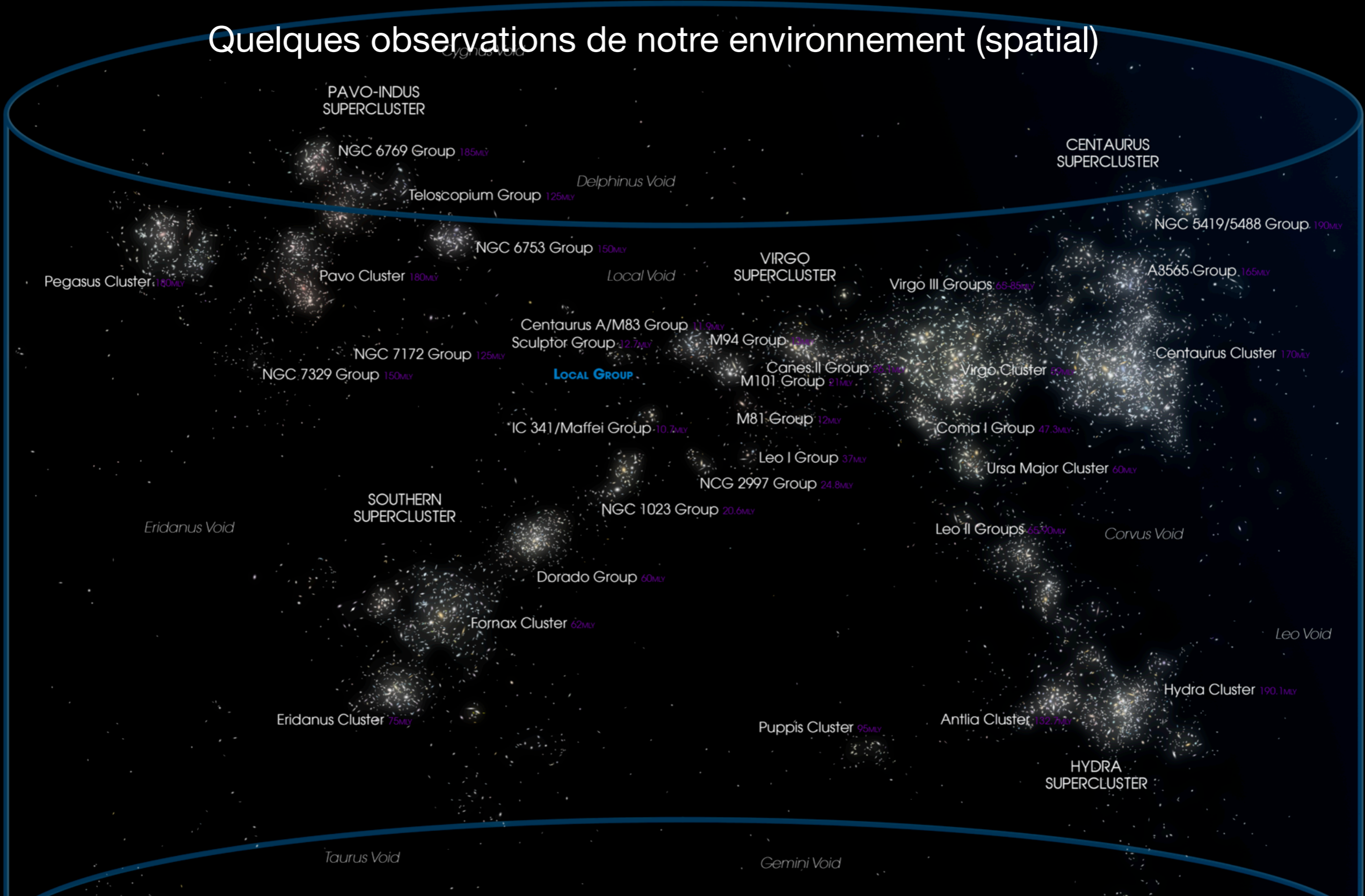
50 000 années-lumière $\sim 5 \times 10^{17}$ kilomètres



Quelques observations de notre environnement (spatial)

..... et des centaines de milliards d'autres galaxies dans l'Univers

Quelques observations de notre environnement (spatial)



LANIAKEA

Laniakea (« paradis incommensurable » ou « horizon céleste immense » en hawaïen) est le superamas de galaxies englobant le superamas de la Vierge, dont fait partie la Voie lactée, et donc la Terre.

Quelques observations de notre environnement (spatial)

natu

Laniakea (« paradis incommensurable » ou « horizon céleste immense » en hawaïen) est le superamas de galaxies englobant le superamas de la Vierge, dont fait partie la Voie lactée, et donc la Terre.


Quelques observations de notre environnement (spatial)



Quelques observations de notre environnement (spatial)

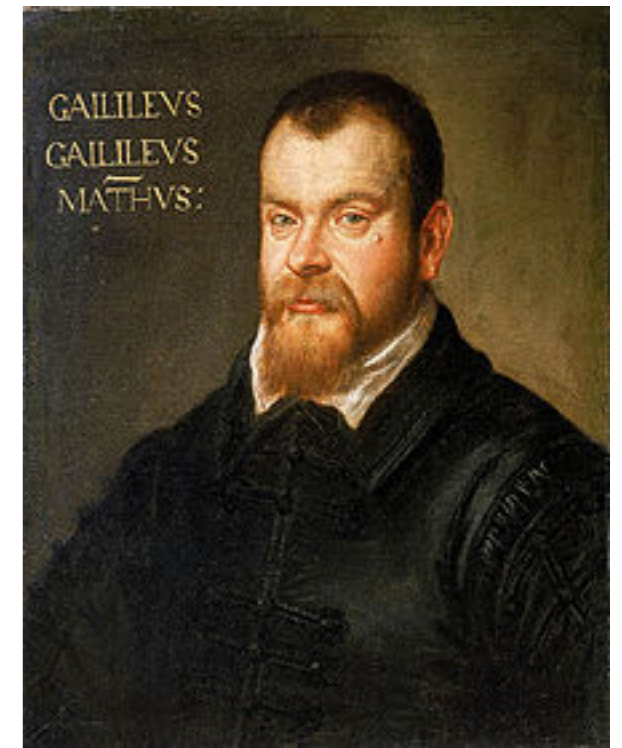
Cosmic Web/toile cosmique



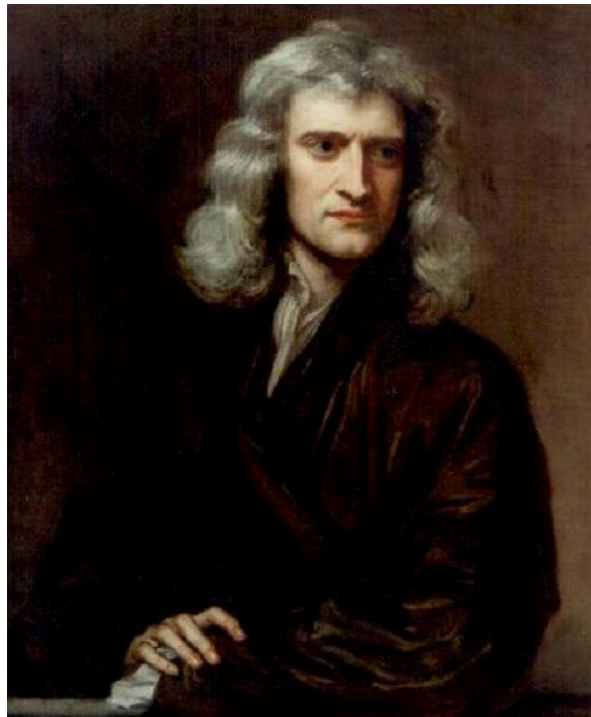
- 
- la Relativité Générale
 - l'Univers observable
 - le rayonnement fossile
 - la recherche des origines aujourd'hui
 - sommes-nous dans un Univers parmi d'autres ?

Relativité galiléenne

- on ne peut distinguer le mouvement rectiligne uniforme de l'immobilité
- les lois de la mécanique sont identiques dans tous les référentiels galiléens (inertiels)



fondement pour les travaux
Newton, e.g. relation
fondamentale de la
dynamique



coefficient d'inertie

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

cette equation est invariante par changement
de référentiel galiléen, par exemple:

$$t' = t$$

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t$$

loi des composition des vitesses : $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$

Extension du postulat de la relativité par Einstein

“Il existe une classe de référentiels privilégiés, en translation uniforme les uns par rapport aux autres, dans lesquels **toutes** les lois de la physique prennent la même forme.”

mécanique + électromagnétisme + etc.

Einstein admet que la vitesse de la lumière est constante dans tout référentiel. c est une constante de la nature.

Extension du postulat de la relativité par Einstein

“Il existe une classe de référentiels privilégiés, en translation uniforme les uns par rapport aux autres, dans lesquels **toutes** les lois de la physique prennent la même forme.”

mécanique + électromagnétisme + etc.

Einstein admet que la vitesse de la lumière est constante dans tout référentiel. c est une constante de la nature.

Cet énoncé semble très proche de la relativité galiléenne ...

... pourtant, sous ce postulat :

- le temps ne s'écoule pas de la même façon dans deux référentiels galiléens en mouvements relatifs
- deux événements qui se produisent simultanément dans un référentiel peuvent se produire à des instants différents dans un autre référentiel

Brochure sur le SI : Le Système international d'unités [8^e édition, 2006 ; mise à jour en 2014]

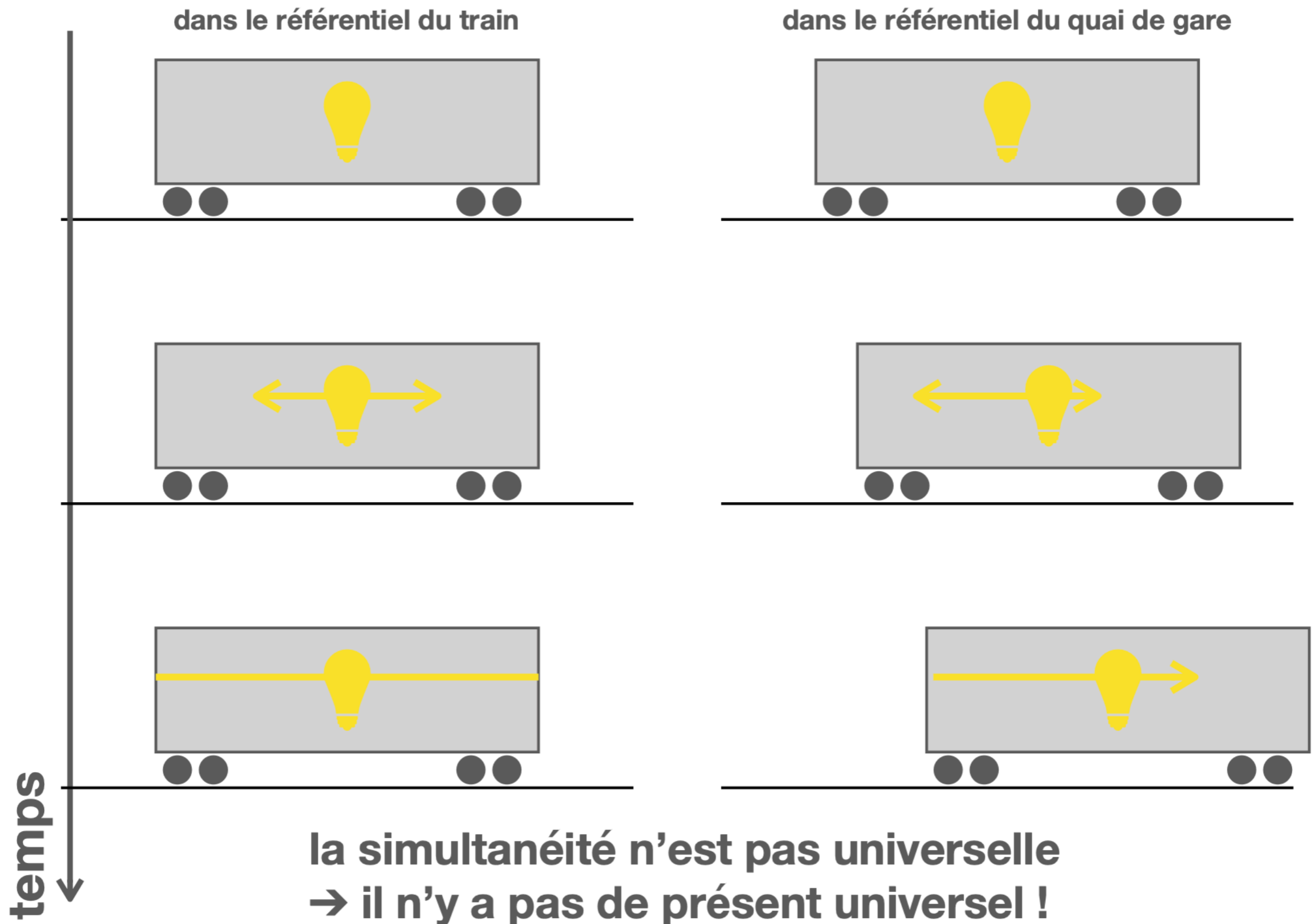
La définition du mètre fondée sur le prototype international en platine iridié, en vigueur depuis 1889, avait été remplacée lors de la 11^e CGPM (1960) par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation de la définition du mètre. Cette réalisation était effectuée au moyen d'un interféromètre et d'un microscope mobile en translation utilisés pour mesurer la variation des trajets optiques par comptage des franges. La 17^e CGPM (1983, Résolution 1) a remplacé en 1983 cette définition par la définition actuelle :

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.

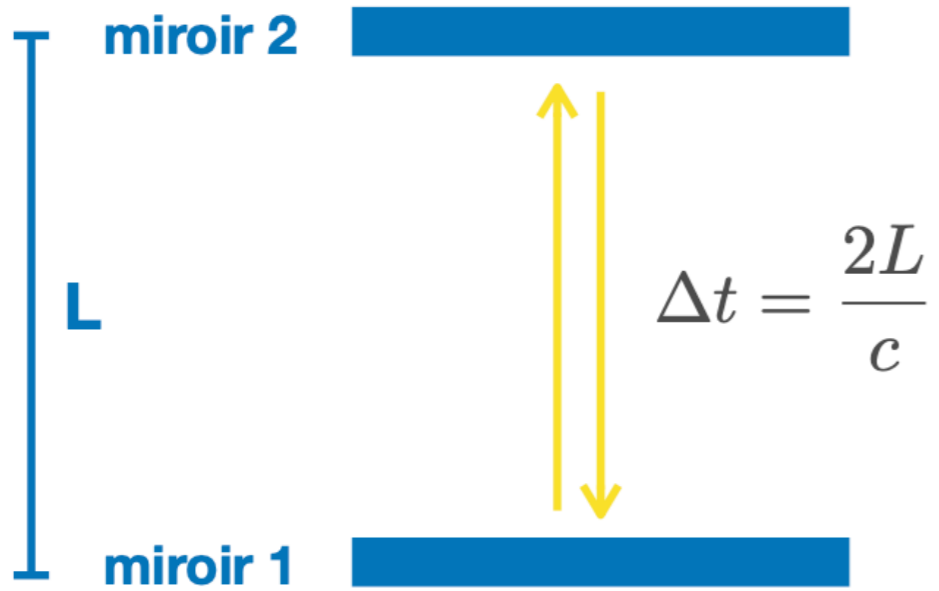
Il en résulte que la vitesse de la lumière dans le vide est égale à 299 792 458 mètres par seconde exactement, $c_0 = 299\,792\,458$ m/s.

Le prototype international du mètre originel, qui fut approuvé par la 1^{re} CGPM en 1889, est toujours conservé au BIPM dans les conditions fixées en 1889.

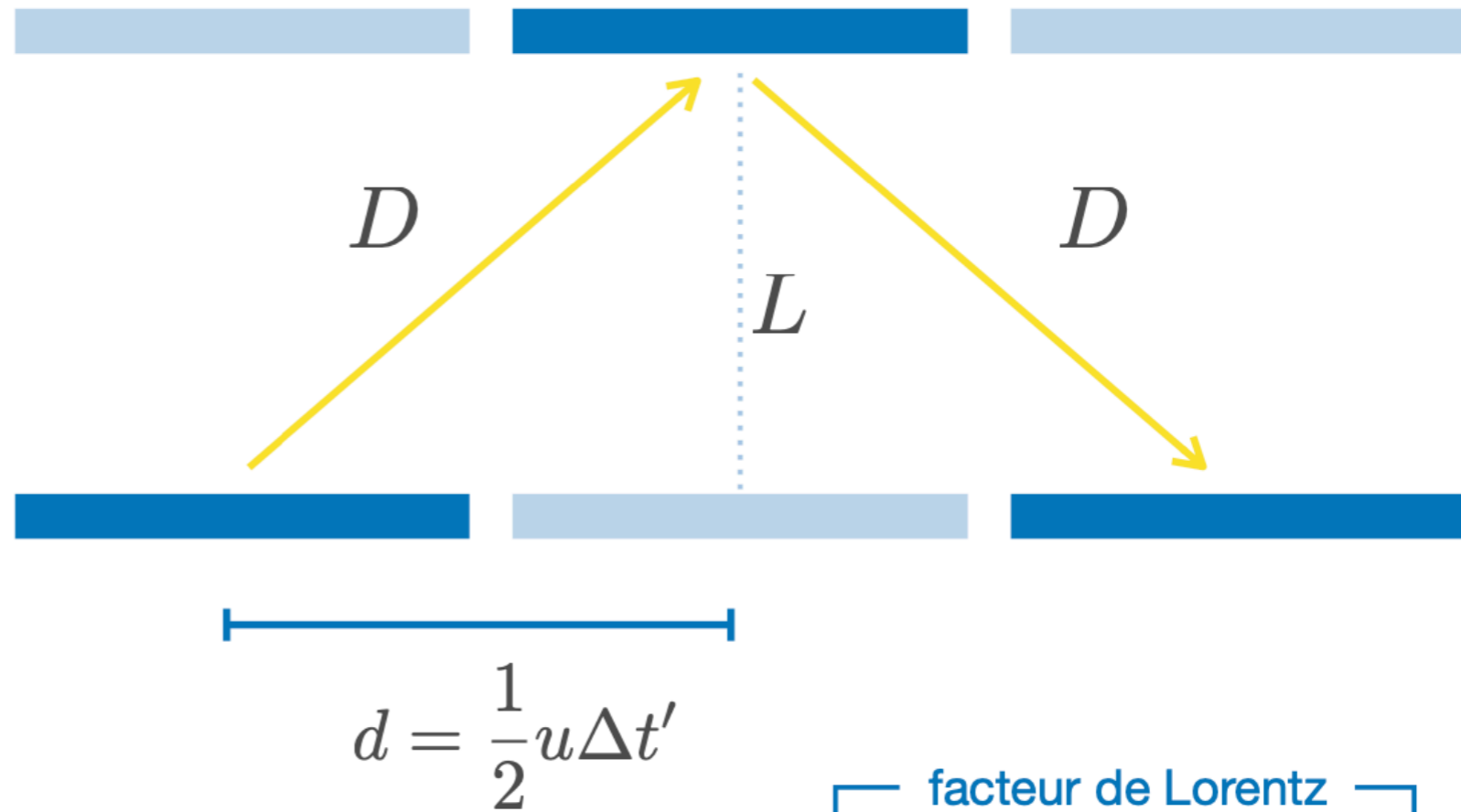
→ pas de mention explicite du référentiel !



dans le référentiel du train



dans le référentiel du quai de gare



Pythagore + invariance de la vitesse de la lumière :

dilatation du temps

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

facteur de Lorentz

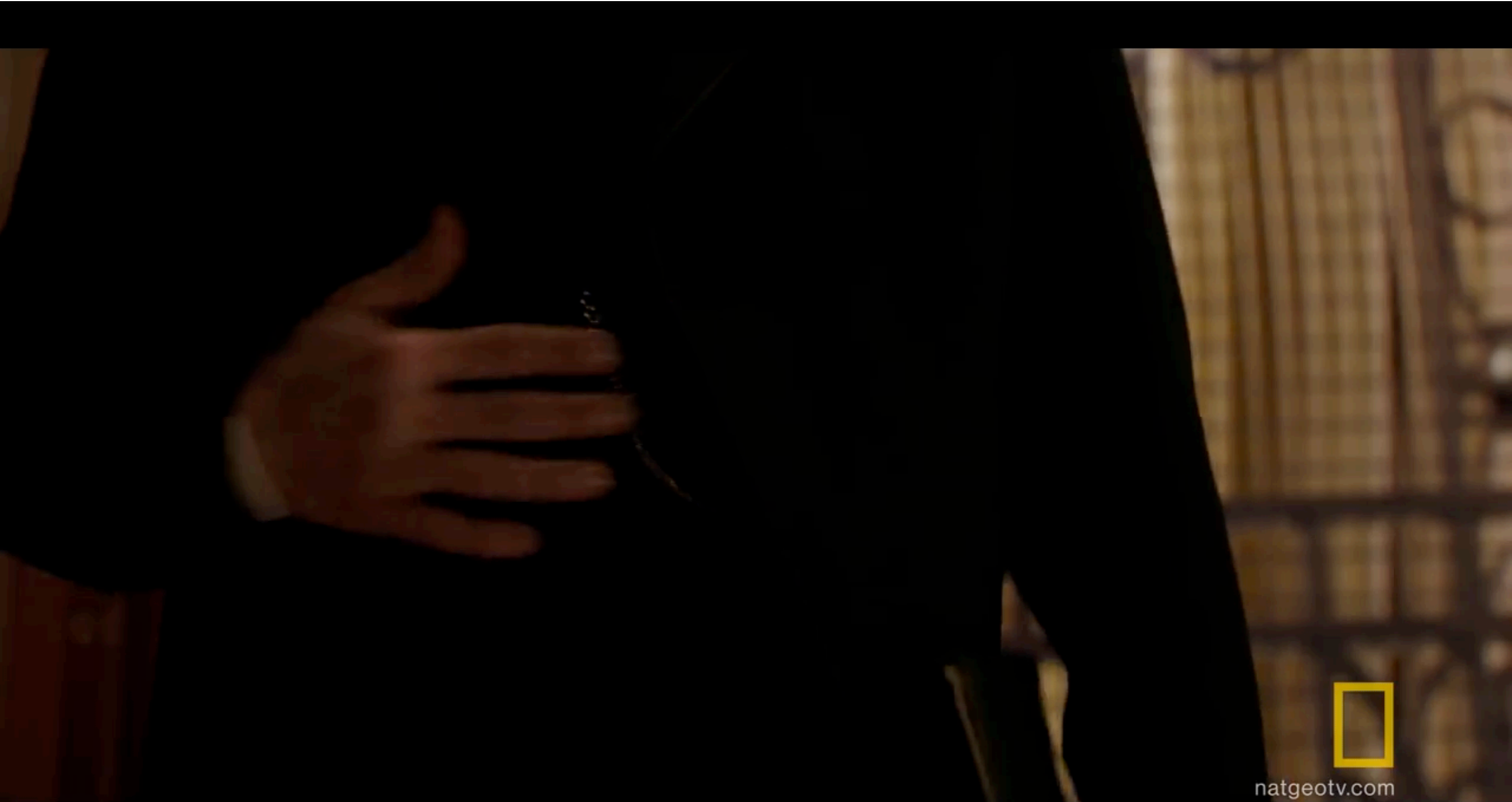
$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

la durée dépend de l'observateur

$$\gamma \geq 1$$

Relativité restreinte + principe d'équivalence > Relativité générale

Dans un référentiel inertiel, les lois de la relativité restreinte sont correctes.
Dans un champ de gravitation, un référentiel en chute libre est **localement** un référentiel inertiel.



Principe d'équivalence : *“il n'existe aucune expérience que des observateurs peuvent réaliser afin de savoir si une accélération est due à la force gravitationnelle ou parce que le référentiel est lui-même en accélération.”*

$$m_i \vec{a} = m_g \vec{g}$$

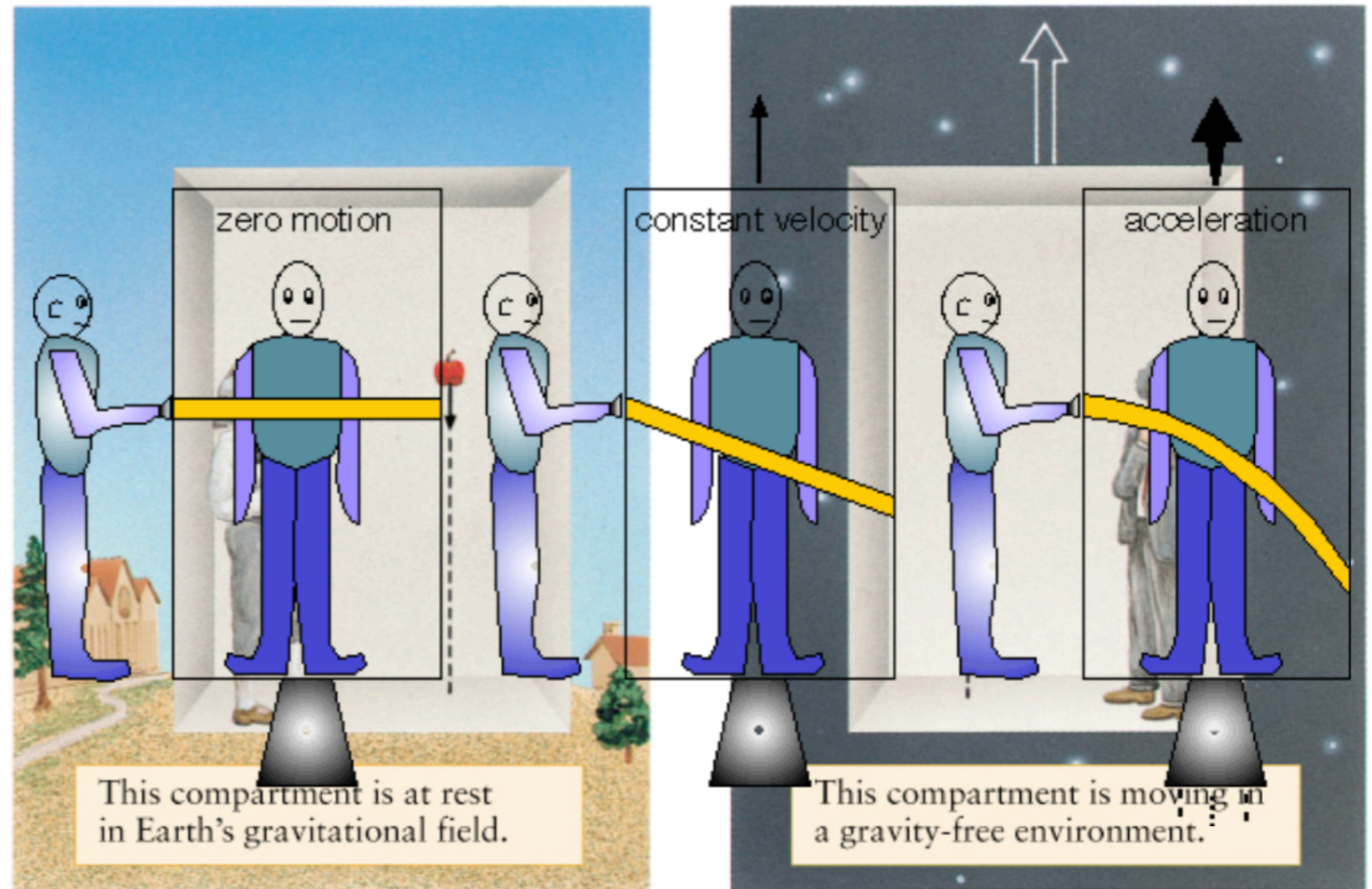
$$\vec{g} = -\vec{\nabla} \phi$$

$$\phi = \frac{MG}{r}$$

Principe d'équivalence:

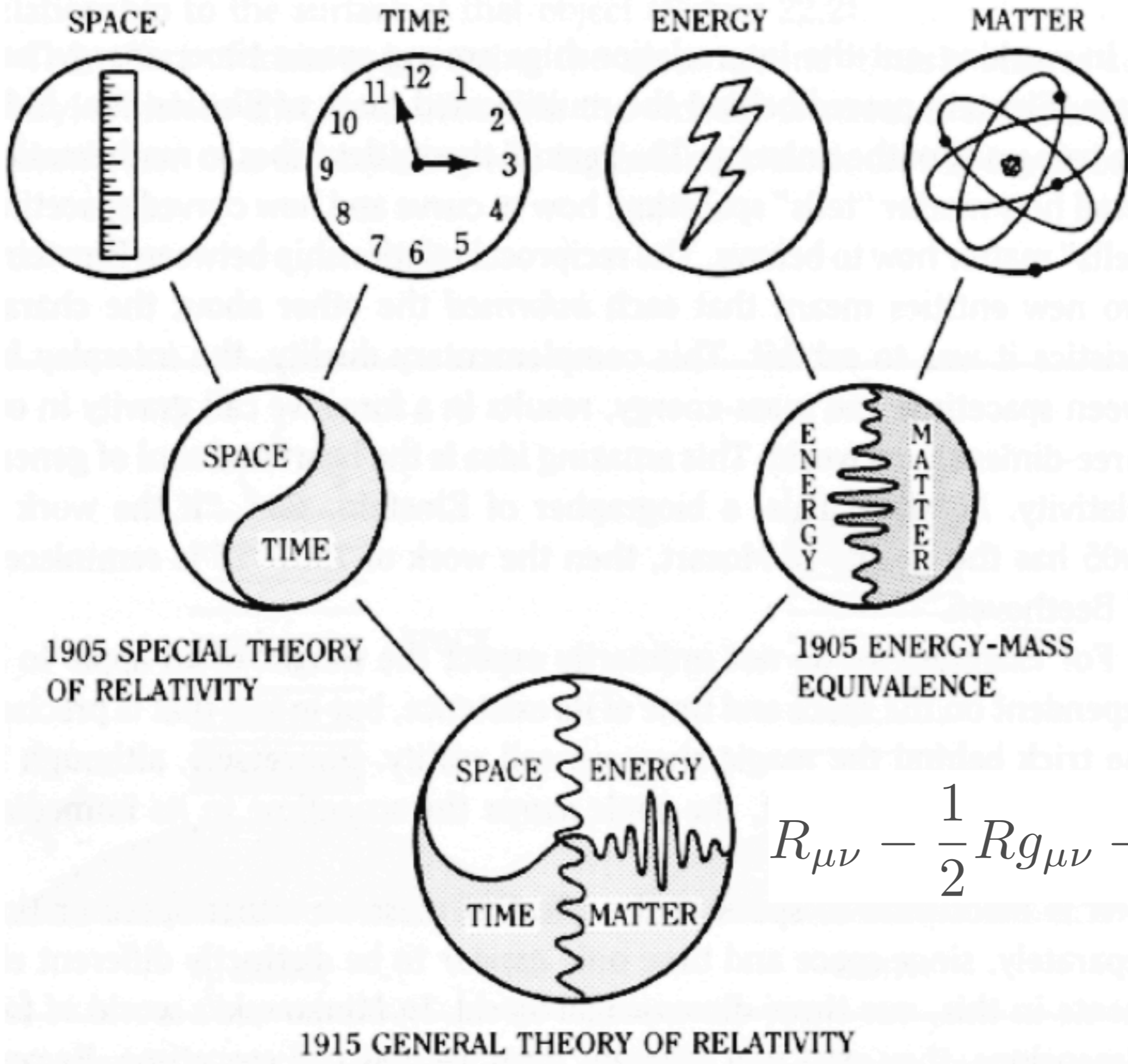
$$m_i = m_g$$

limite observationnelle actuelle:
 $(1 - m_i/m_g) \sim O(10^{-15})$



(a) The apple hits the floor of the compartment because Earth's gravity accelerates the apple downward.

(b) The apple hits the floor of the compartment because the compartment accelerates upward.



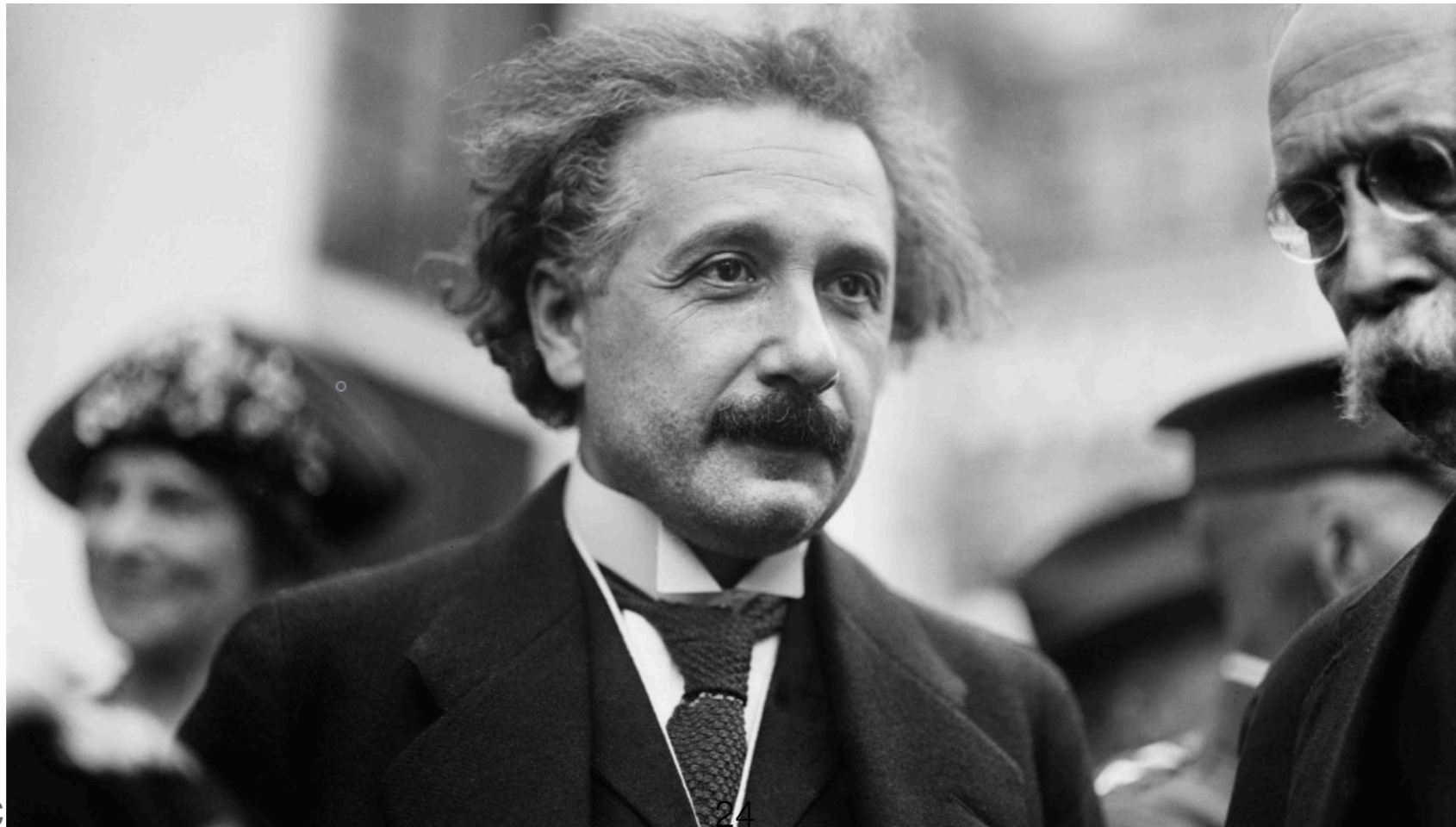
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Les équations de la relativité générale

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

géométrie de
l'espace-temps

contenu
énergétique



Relativité = une nouvelle géométrie

géométrie euclidienne

- espace euclidien
- point
- ligne courbe joignant deux points
$$(d\ell)^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

↳ longueur le long d'une ligne courbe
- ligne de plus court chemin = droite
- inégalité triangulaire

géométrie espace-temps

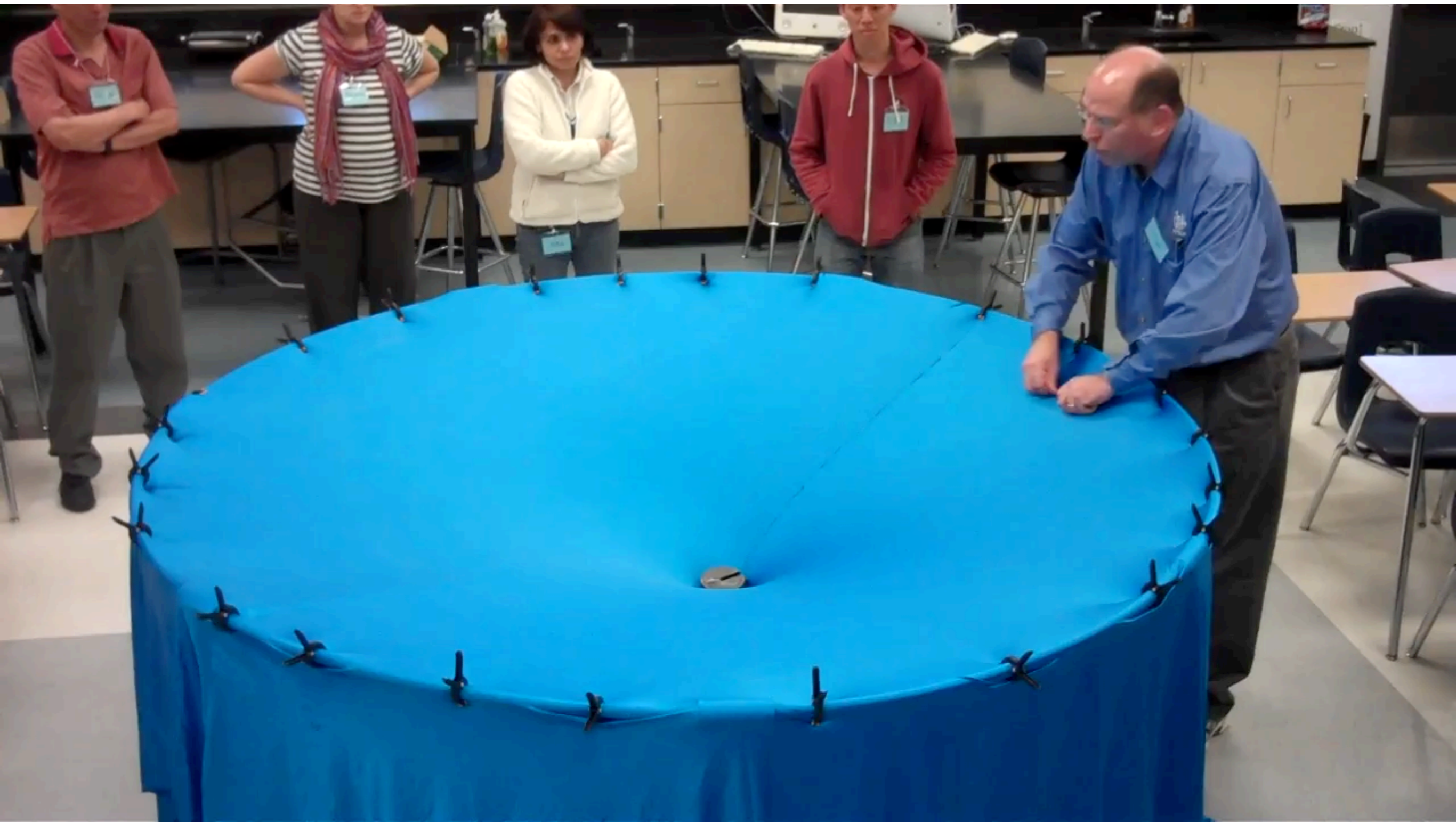
- espace-temps de Minkowski
- événement x^μ
- ligne d'univers joignant deux événements
$$(ds)^2 = (cdt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

↳ temps propre le long d'une ligne d'univers
- ligne de plus long temps propre = mouvement inertiel
- voyageur de Langevin

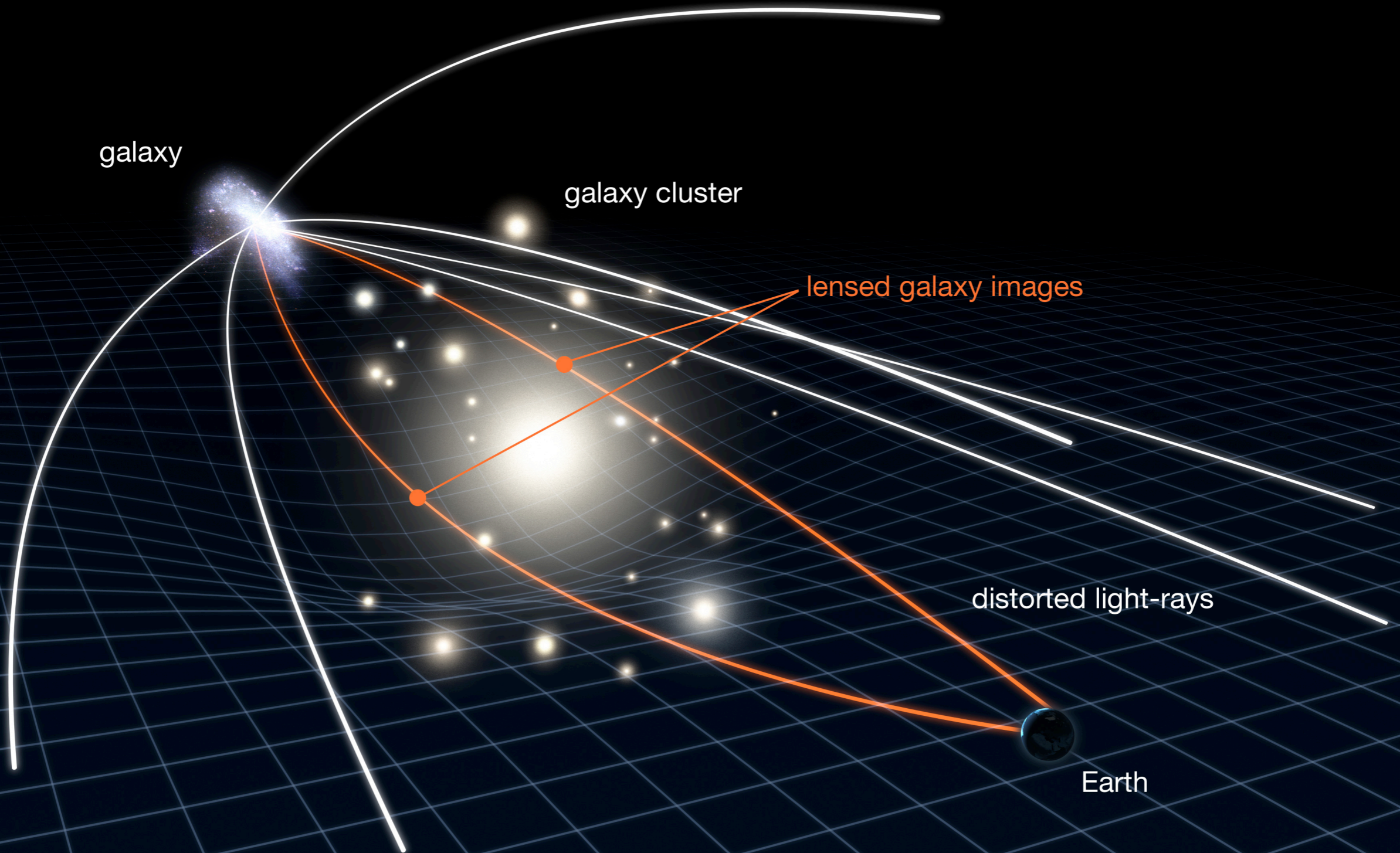


l'espace-temps, nouvelle description de la gravité

l'espace-temps, nouvelle description de la gravité



le lentillage gravitationnel, une prédiction de la relativité d'Einstein

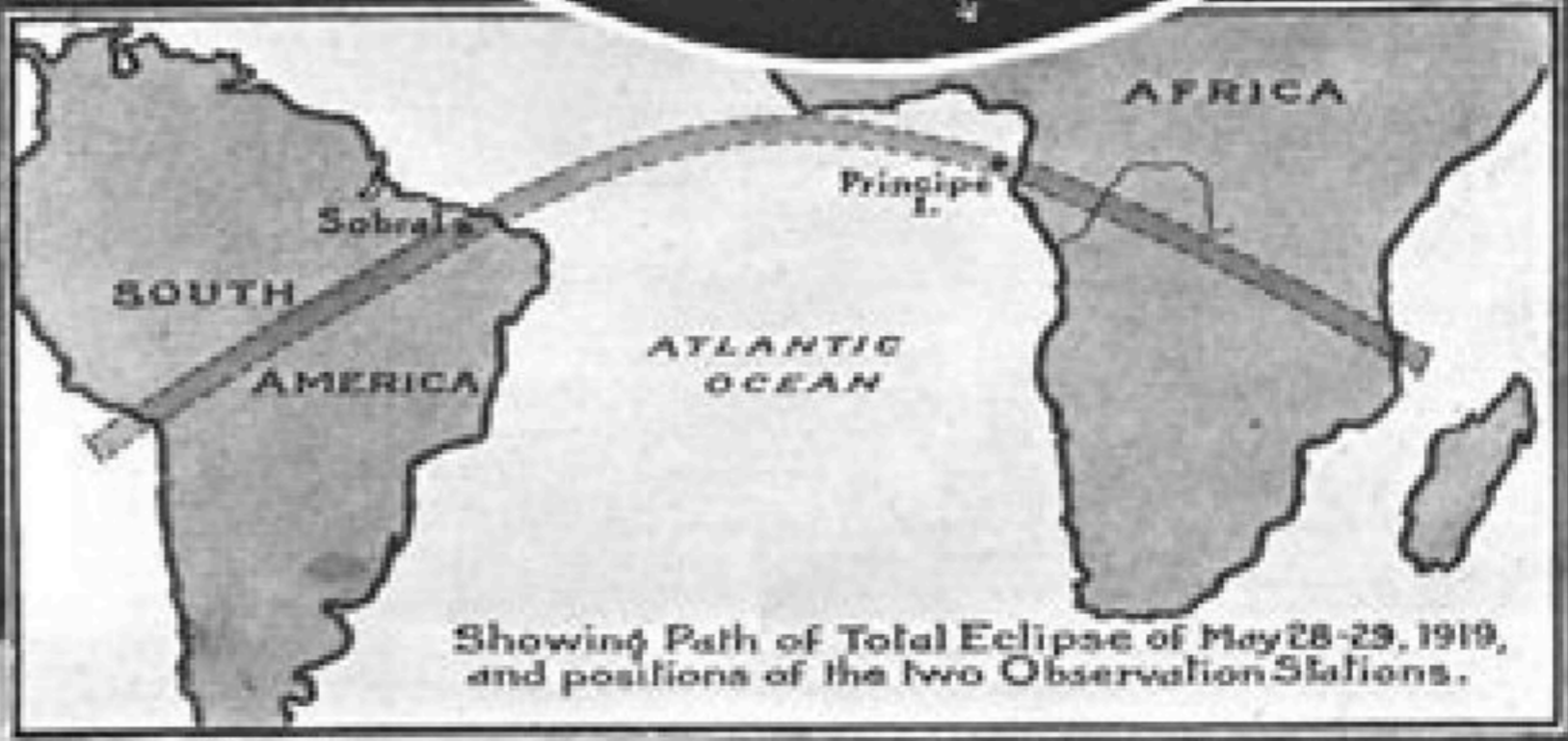


Apparent Position: |
Actual Position: *

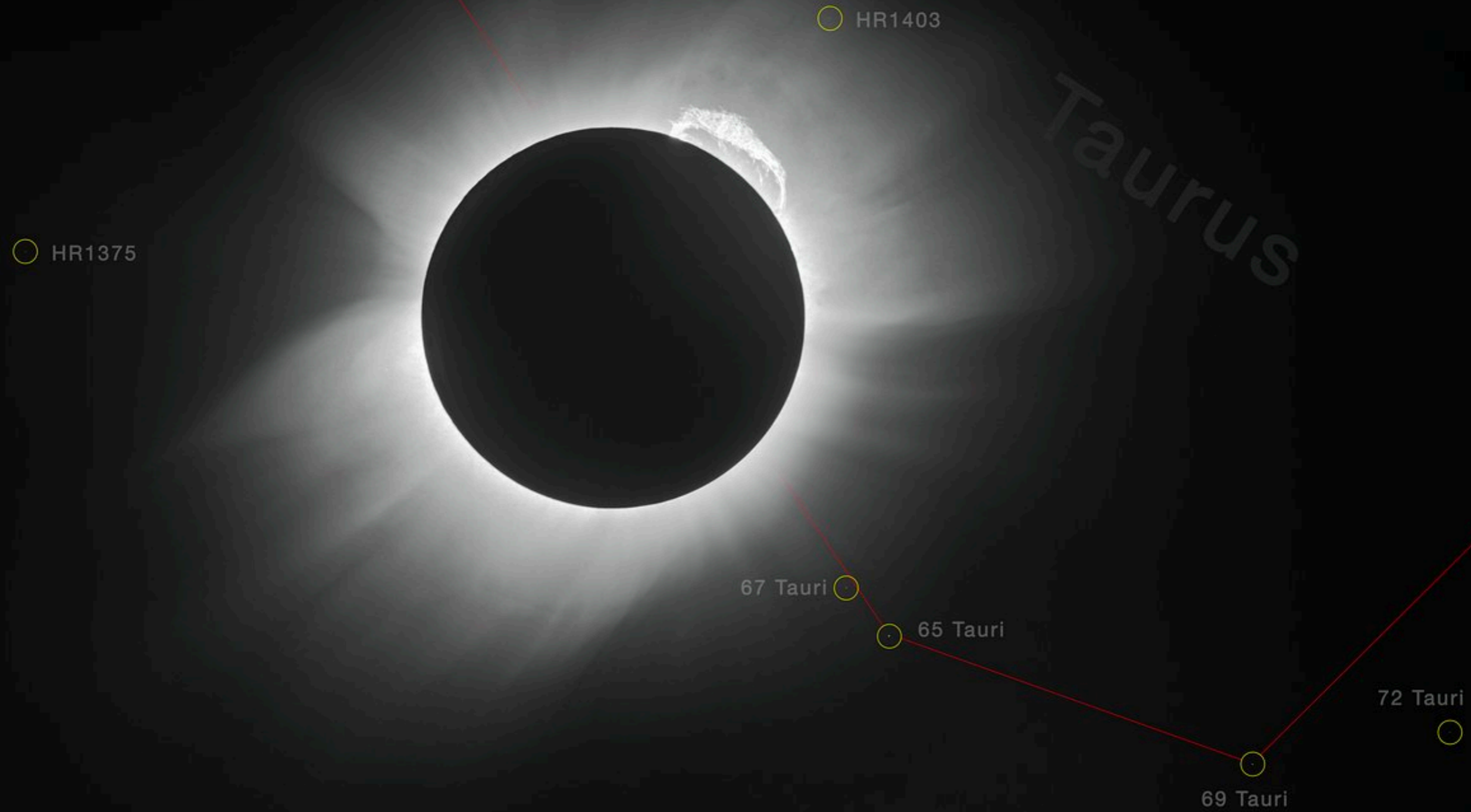
THE SUN
Distance from
the Earth
93,000,000 miles



éclipse totale 1919

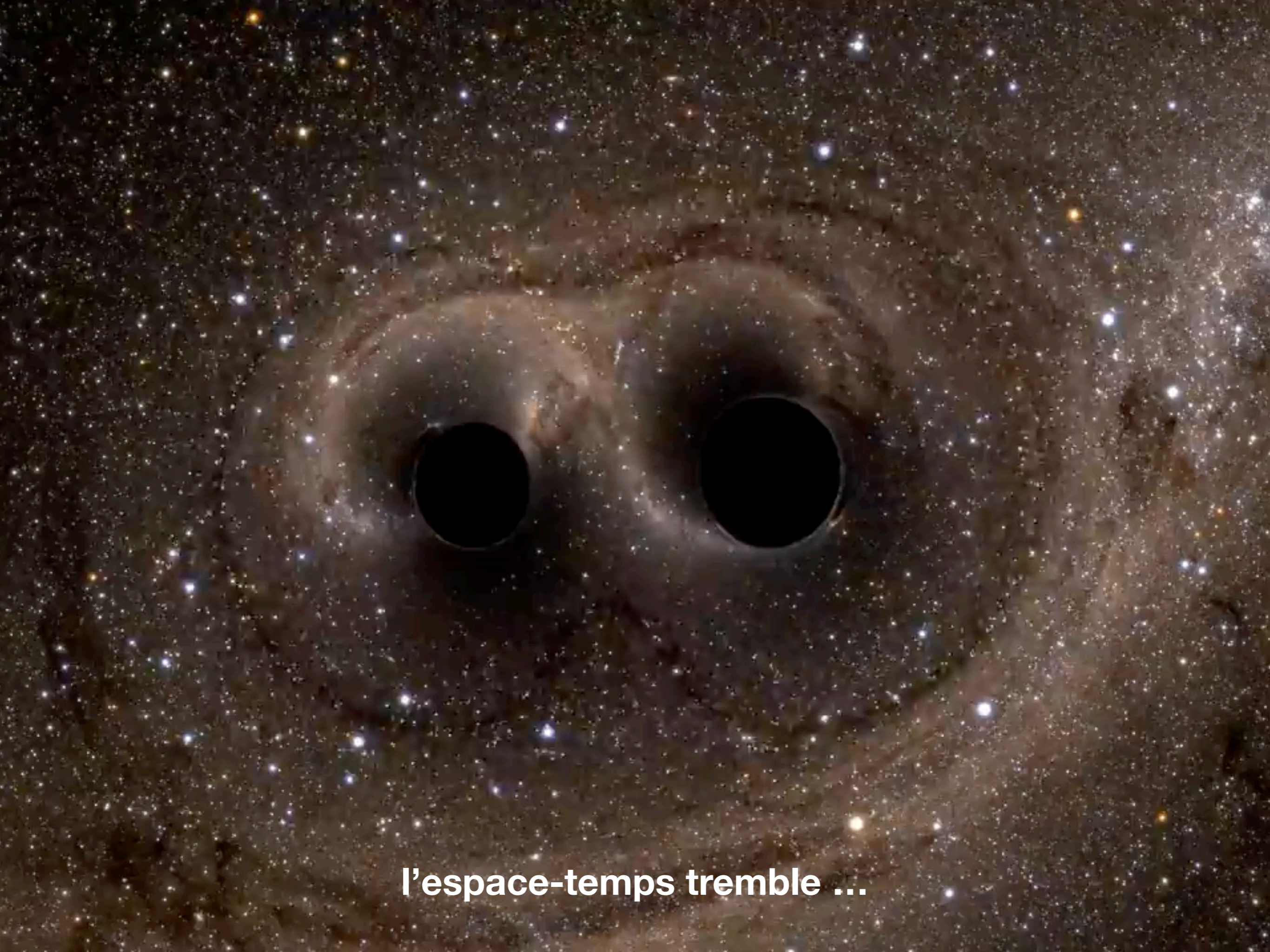


éclipse totale 1919

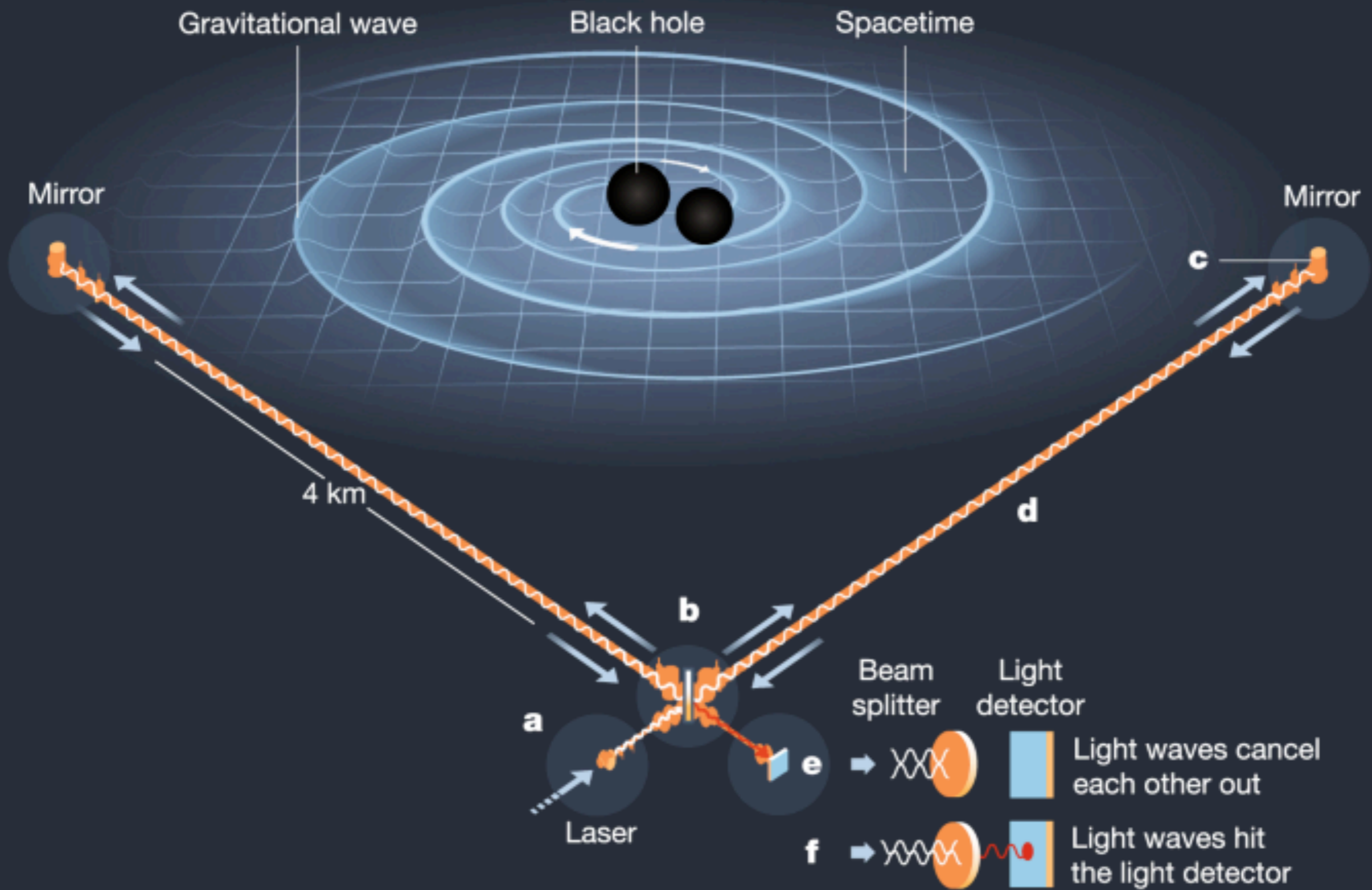




l'espace-temps a une réalité physique



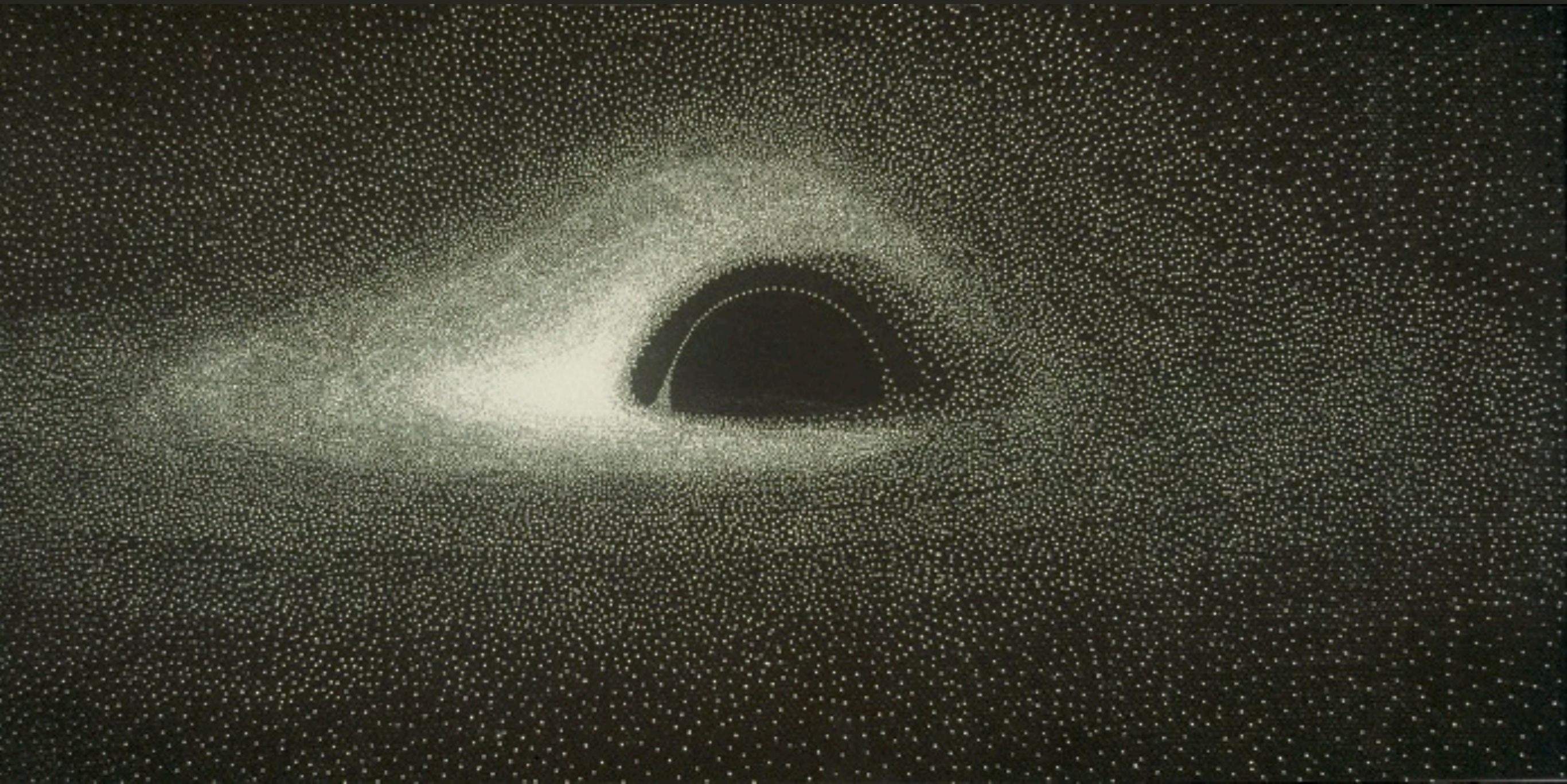
l'espace-temps tremble ...



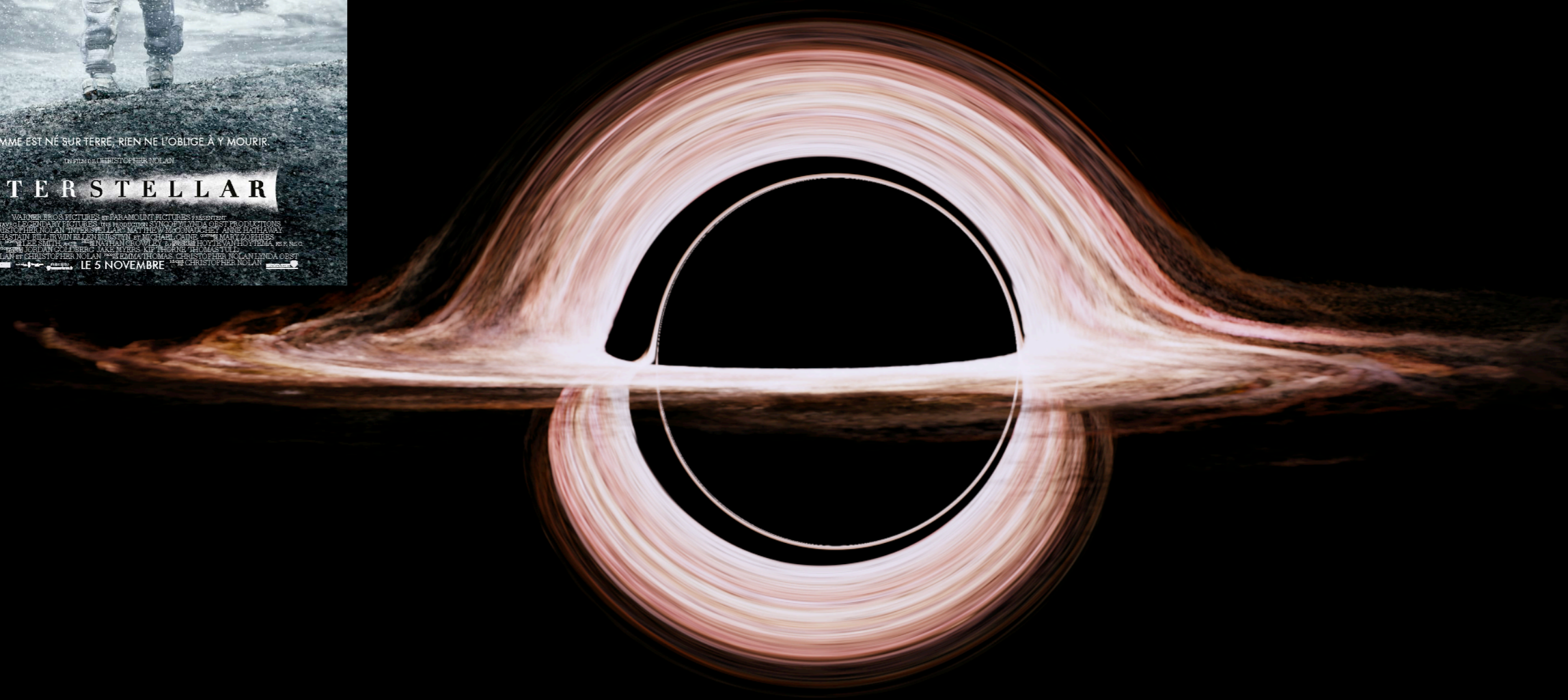
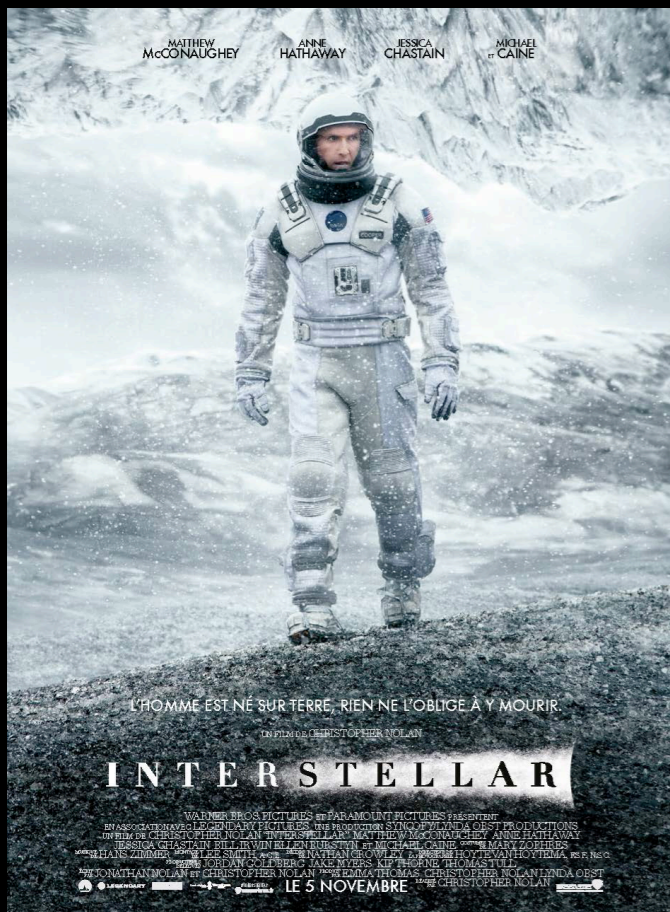
l'espace-temps tremble ...



l'espace-temps tremble ...

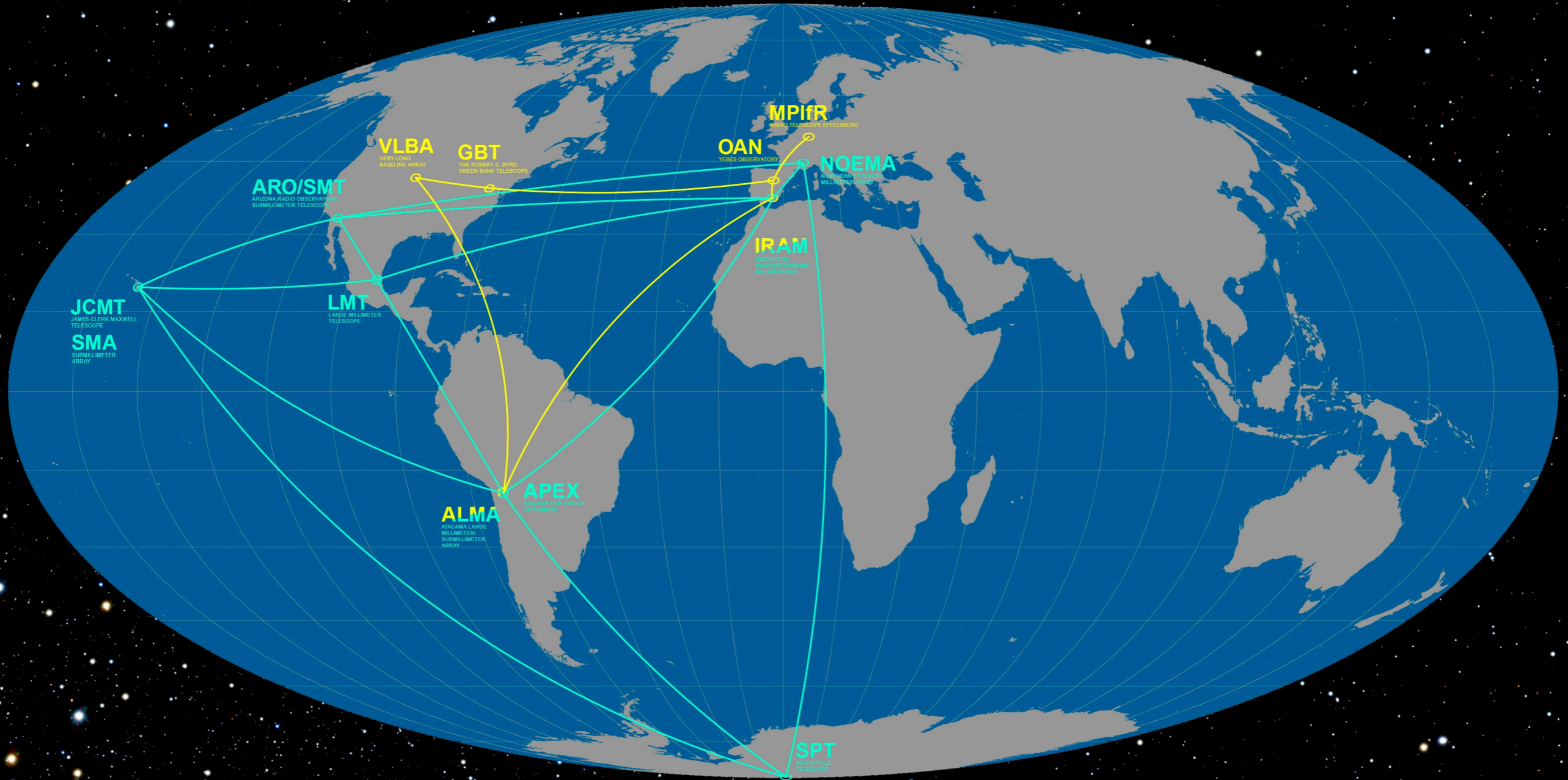


La simulation d'un trou noir publiée en 1979 © Jean-Pierre Luminet/CNRS Photothèque



les trous noirs ont une réalité physique

Event Horizon Telescope



les trous noirs ont une réalité physique



les trous noirs ont une réalité physique

EHT Collaboration

c est une constante de la nature.

Speed of Light
7.5 orbits per second at surface



James O'Donoghue / NASA — T: @physicsJ IG: jameslikesspace

c est une contante de la nature.

EARTH AND MOON

— to scale —

Speed of light in real-time
Surface-to-surface in 1.255 seconds



EARTH

MOON

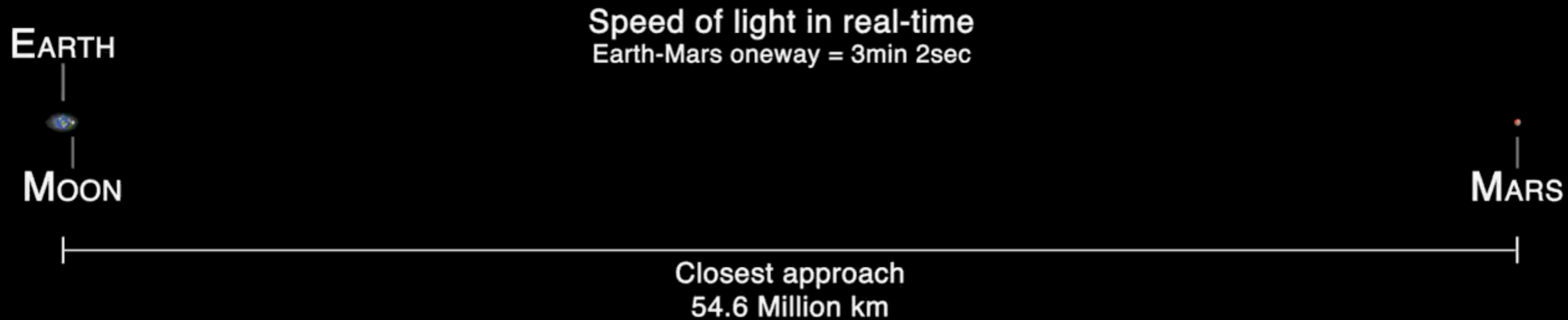
Average distance
384,400 km

James O'Donoghue / NASA imagery — T: @physicsJ IG: jameslikesspace

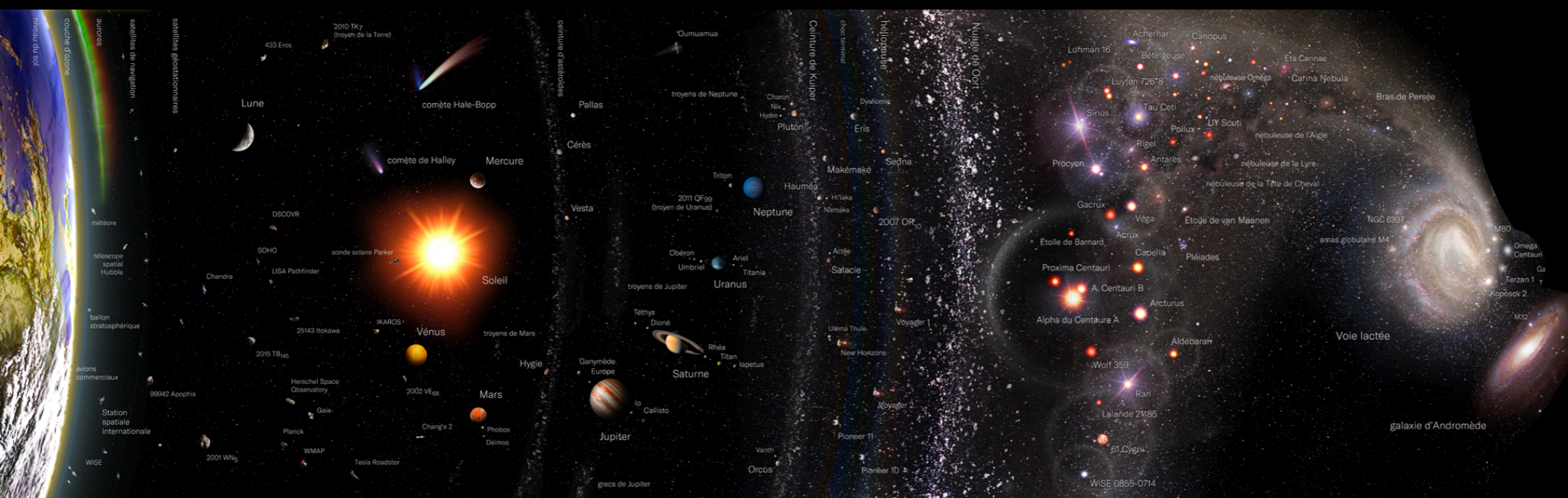
c est une contante de la nature.

EARTH, MOON AND MARS

— All distances to scale; bodies x20 larger —

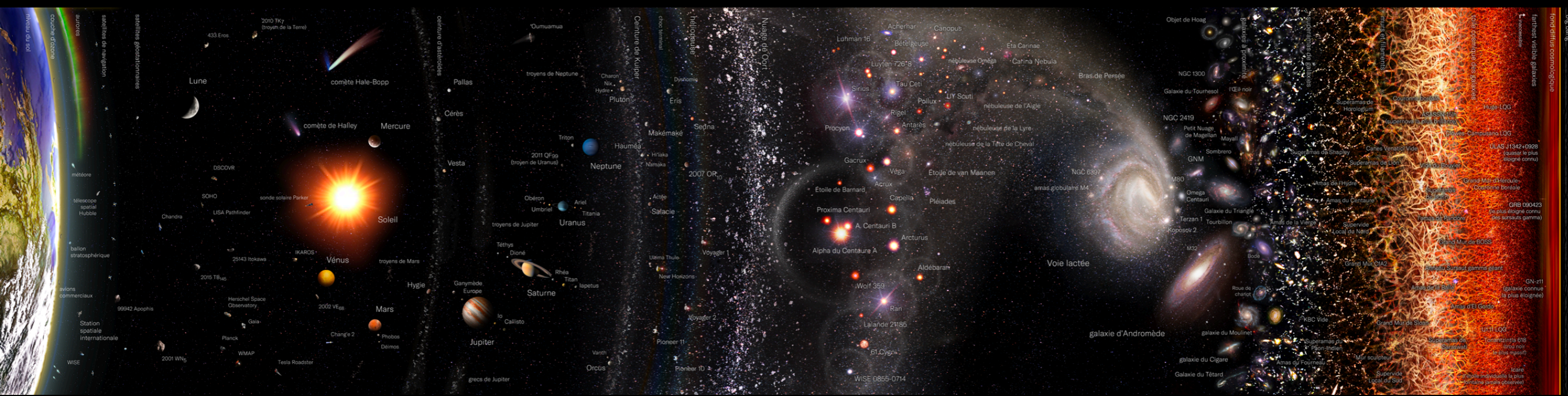


James O'Donoghue / NASA imagery — T: @physicsJ IG: jameslikesspace



← 8 minutes →

← 2,5 millions d'années →



premières galaxies

premières étoiles

âges sombres

Big Bang?



A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and nodes. The filaments are thin, thread-like structures that connect larger, more dense regions. The nodes are bright, glowing orange and yellow clusters, representing galaxy clusters or superclusters. The overall structure is intricate and interconnected, illustrating the large-scale structure of the universe.

L'Univers observable

l'Univers est globalement homogène aux grandes échelles, nous n'y occupons pas une place privilégiée : c'est le principe cosmologique

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\mathcal{R} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

géométrie de l'espace-temps

contenu énergétique

fluide parfait

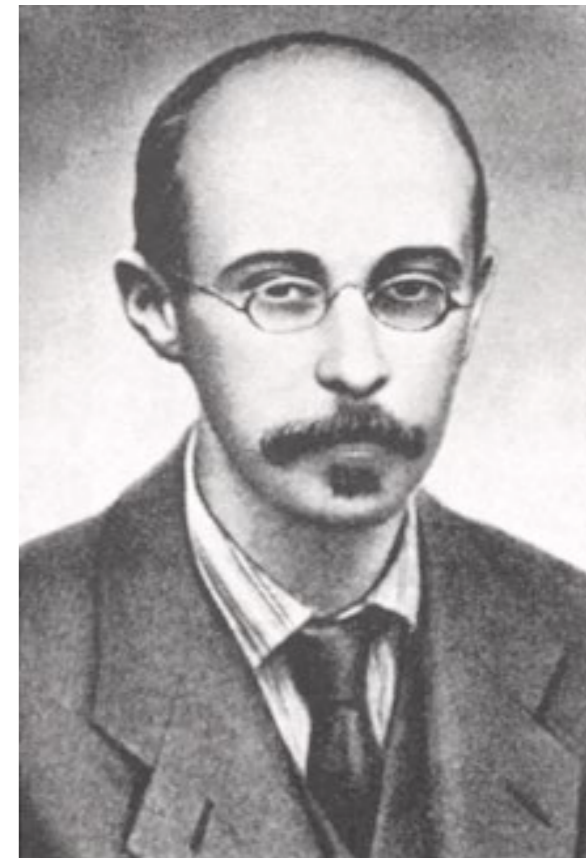
$$T_{\mu\nu} = -p g_{\mu\nu} + (p + \rho) u_\mu u_\nu$$

homogénéité et isotropie

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Equations de Friedmann

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p)$$

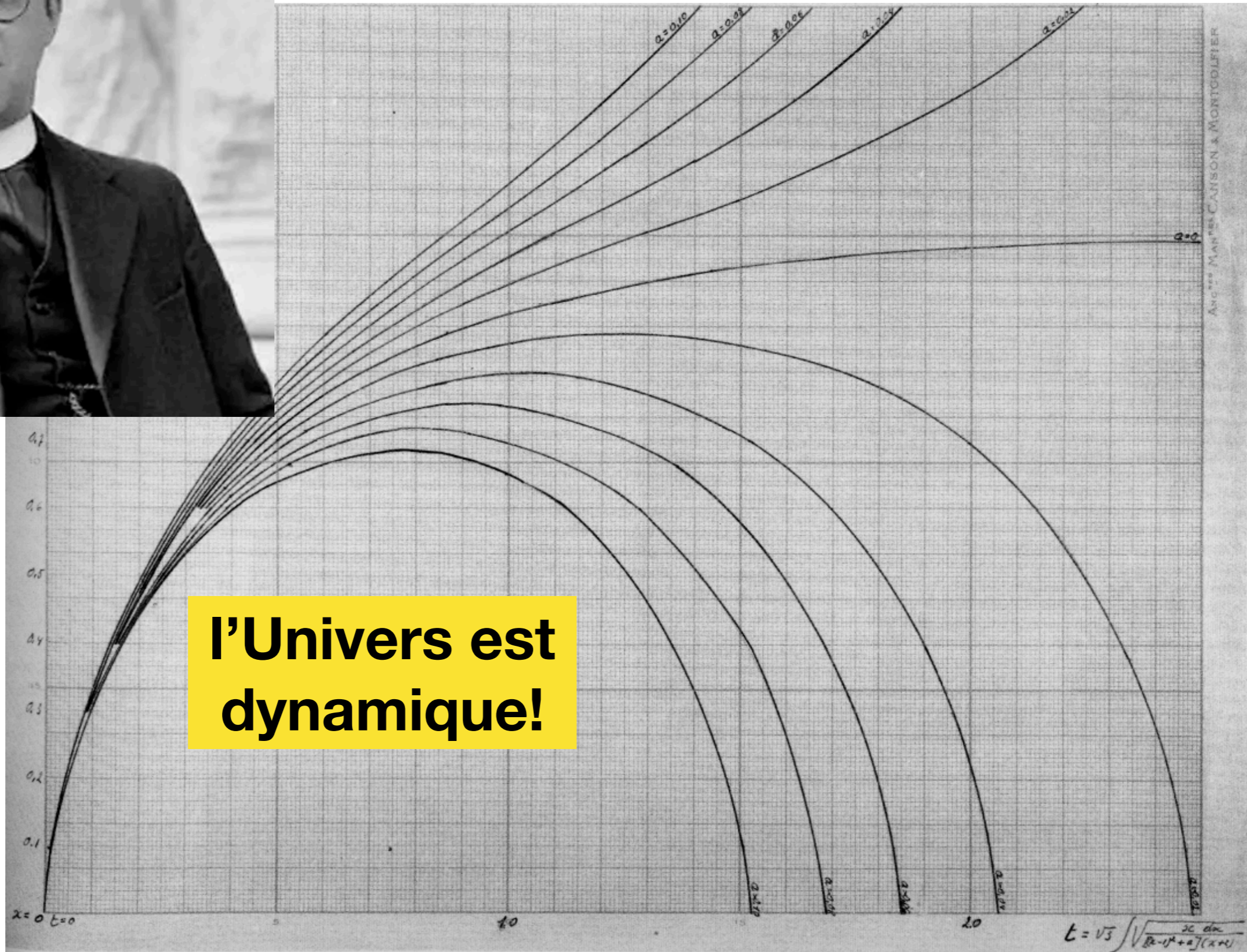




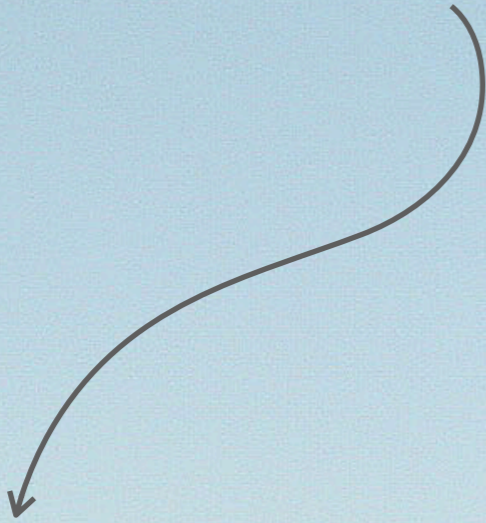
$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\mathcal{R} = 8\pi G_{\text{N}}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

taille de l'Univers \uparrow

l'Univers est dynamique!



Mont Wilson à Los Angeles



Henrietta Swan Leavitt



mesure des distances grâce aux Céphéides

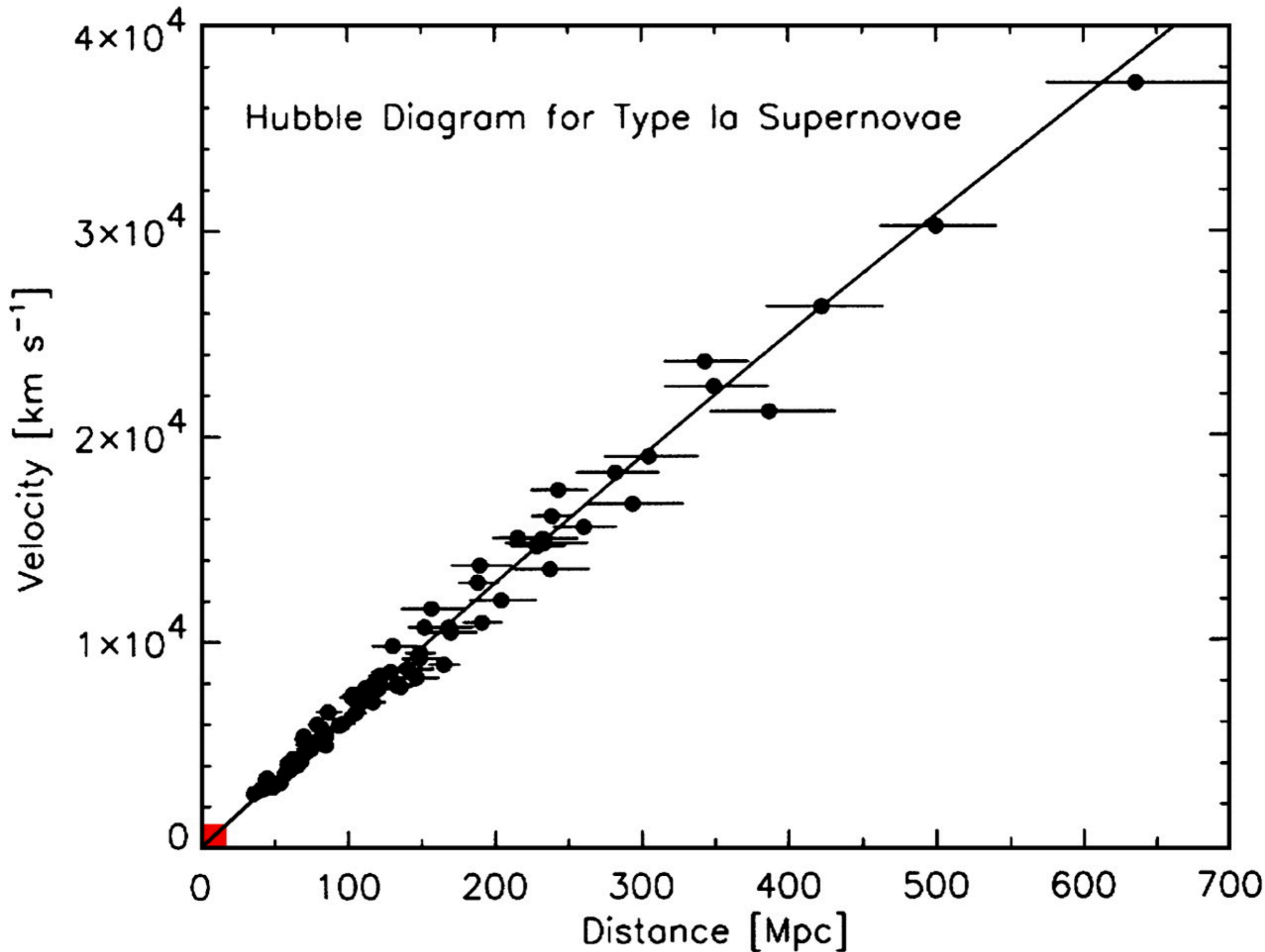
Vesto Melvin Slipher



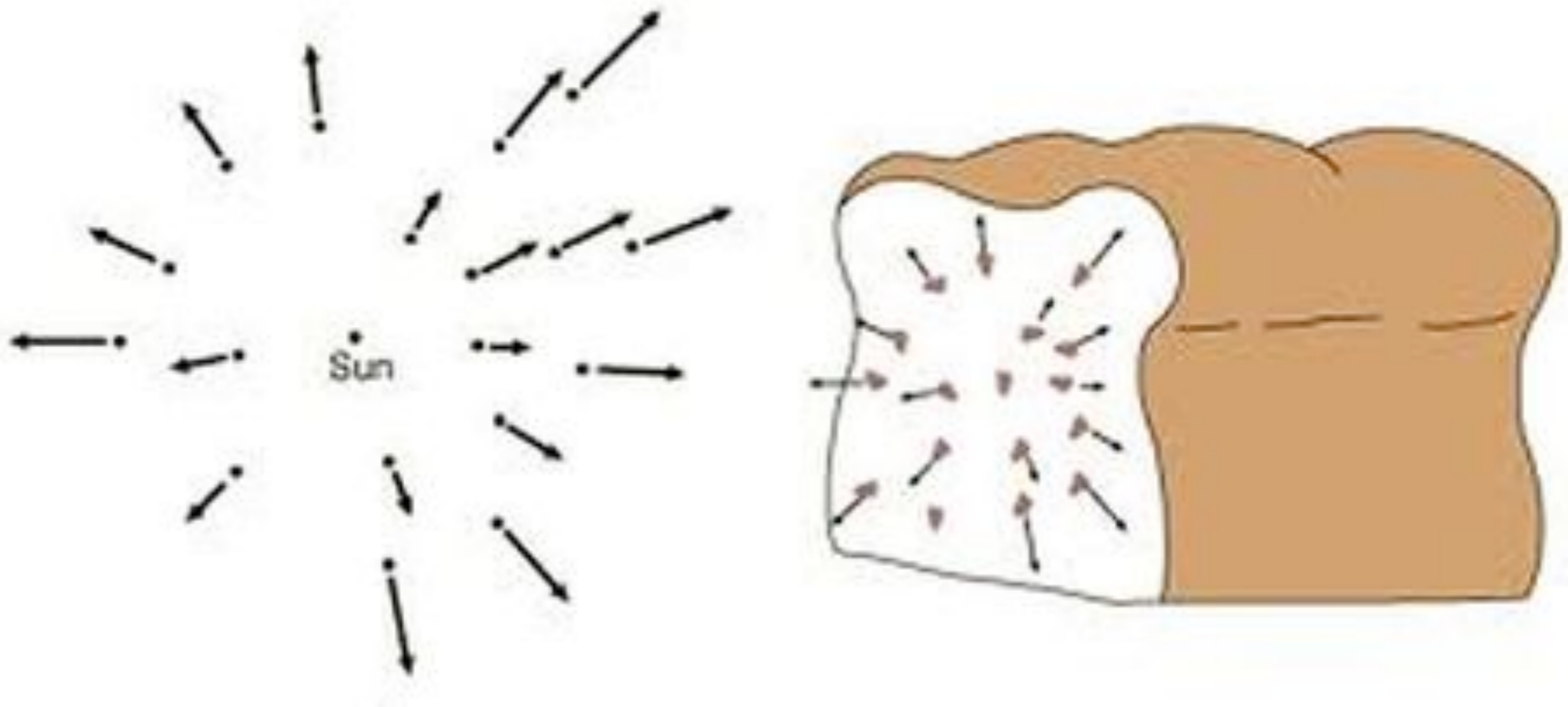
décalage vers le rouge des nébuleuses



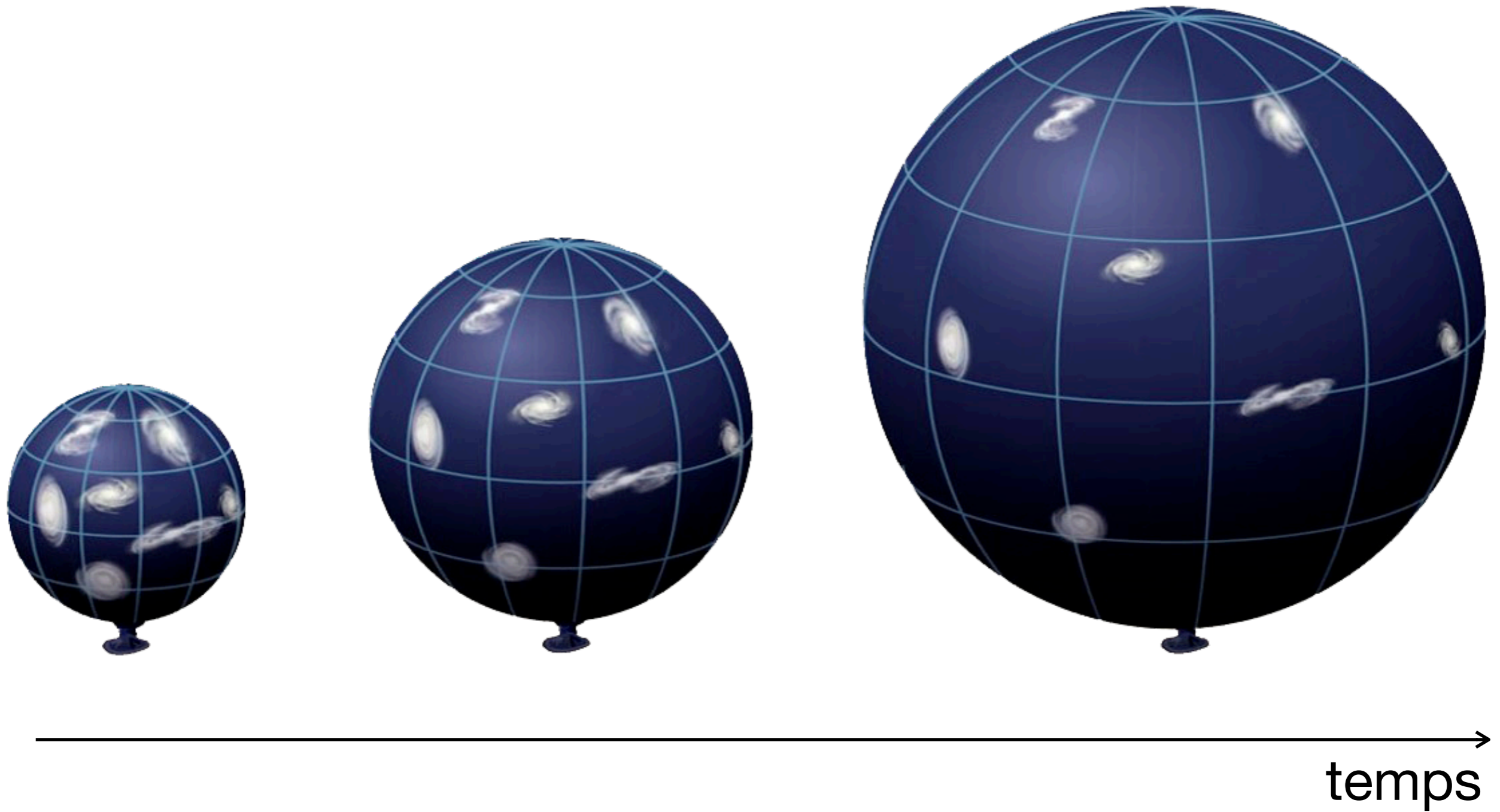
Edwin Hubble



L'Univers est en expansion (i)

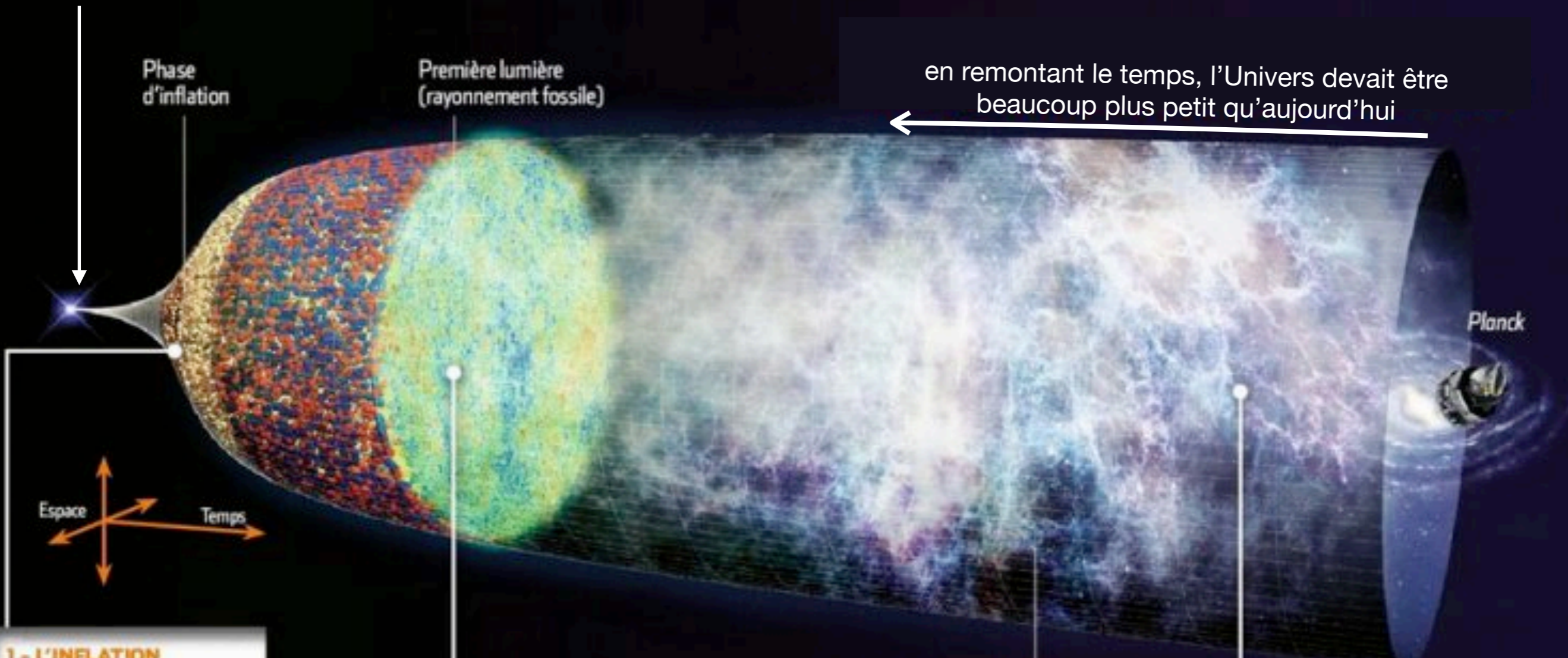


L'Univers est en expansion (ii)



Big Bang

l'Univers est en expansion (iv)



en remontant le temps, l'Univers devait être beaucoup plus petit qu'aujourd'hui

1 - L'INFLATION BRUTALE SE CONFIRME

Entre 10^{-38} et 10^{-30} seconde après le big bang, l'Univers aurait connu une phase d'expansion exponentielle, appelée inflation. Pour la première fois, le satellite *Planck* en dévoile la dynamique et confirme qu'elle s'est terminée par un ralentissement progressif.

2 - TROIS ANOMALIES ENTACHENT LE FOND LUMINEUX DE L'UNIVERS

380 000 ans après le big bang, les protons et les neutrons s'assemblent pour former des noyaux, libérant des flots de photons. L'Univers émet sa première lumière. En épluchant les fluctuations de ce fond lumineux, *Planck* a dévoilé trois anomalies qui semblent contredire le modèle cosmologique.

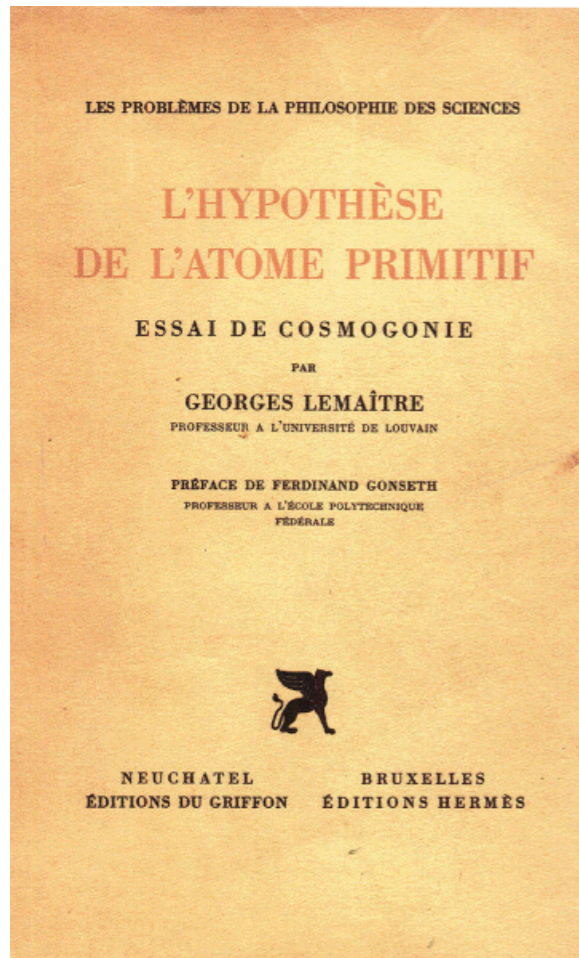
Formation des galaxies

3 - LA RECETTE DE L'UNIVERS A UN NOUVEAU DOSAGE

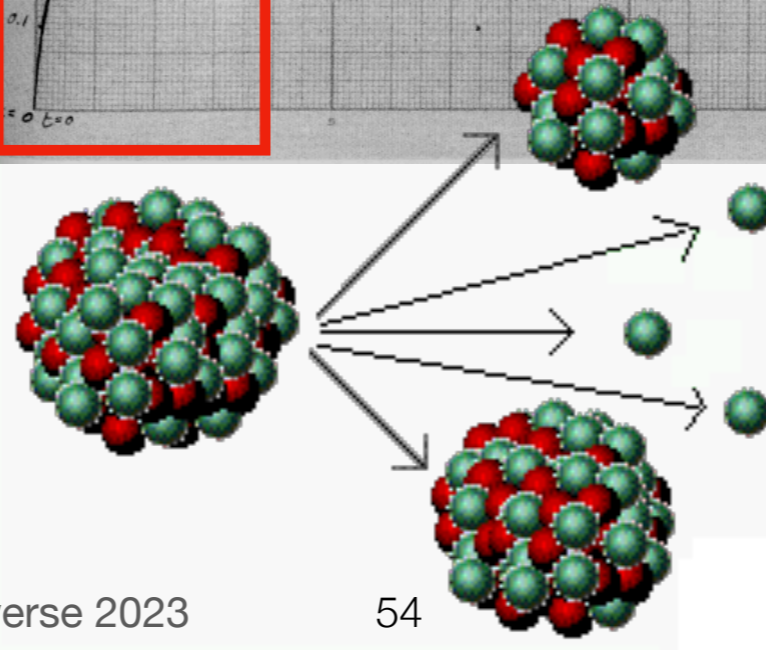
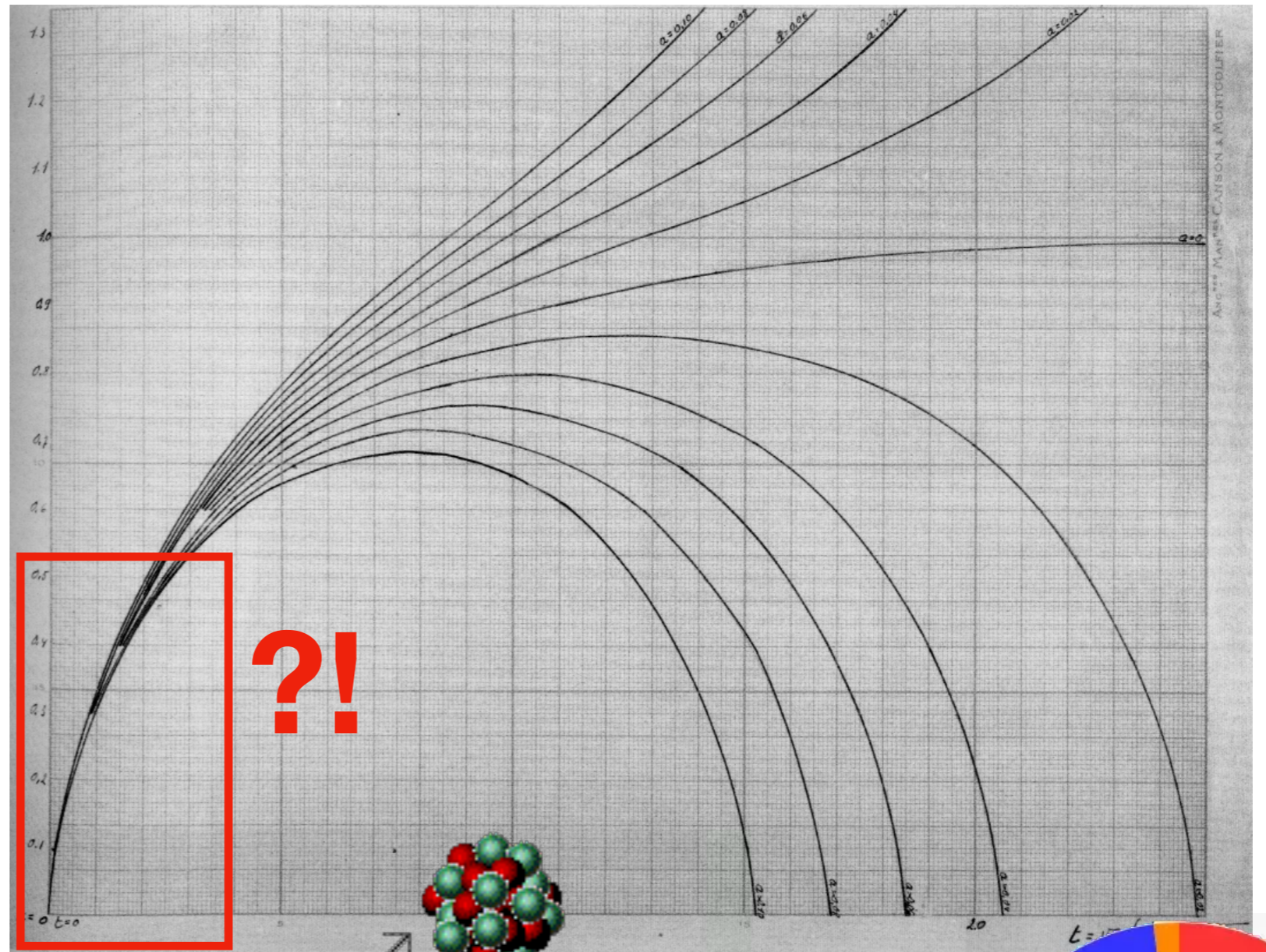
Planck vient de recalculer tous les paramètres cosmologiques : l'Univers s'avère âgé de 13,82 milliards d'années ; il est composé de 4,9% de poussières et de galaxies, de 26,8% de matière noire et de 68,3% d'énergie noire ; et il s'étend à la vitesse de 67 kilomètres par seconde.



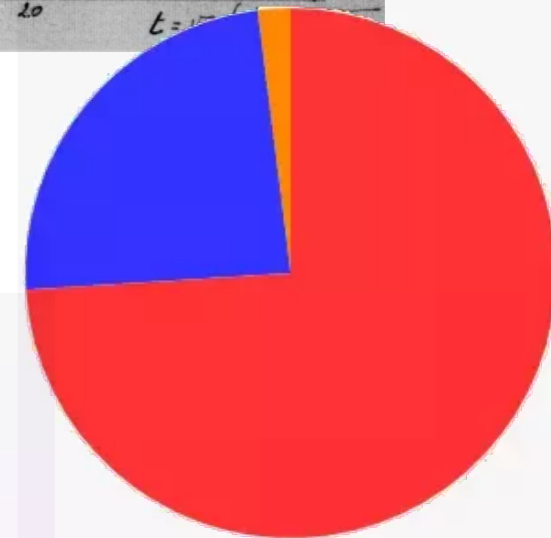
Georges Lemaître (1894-1966)

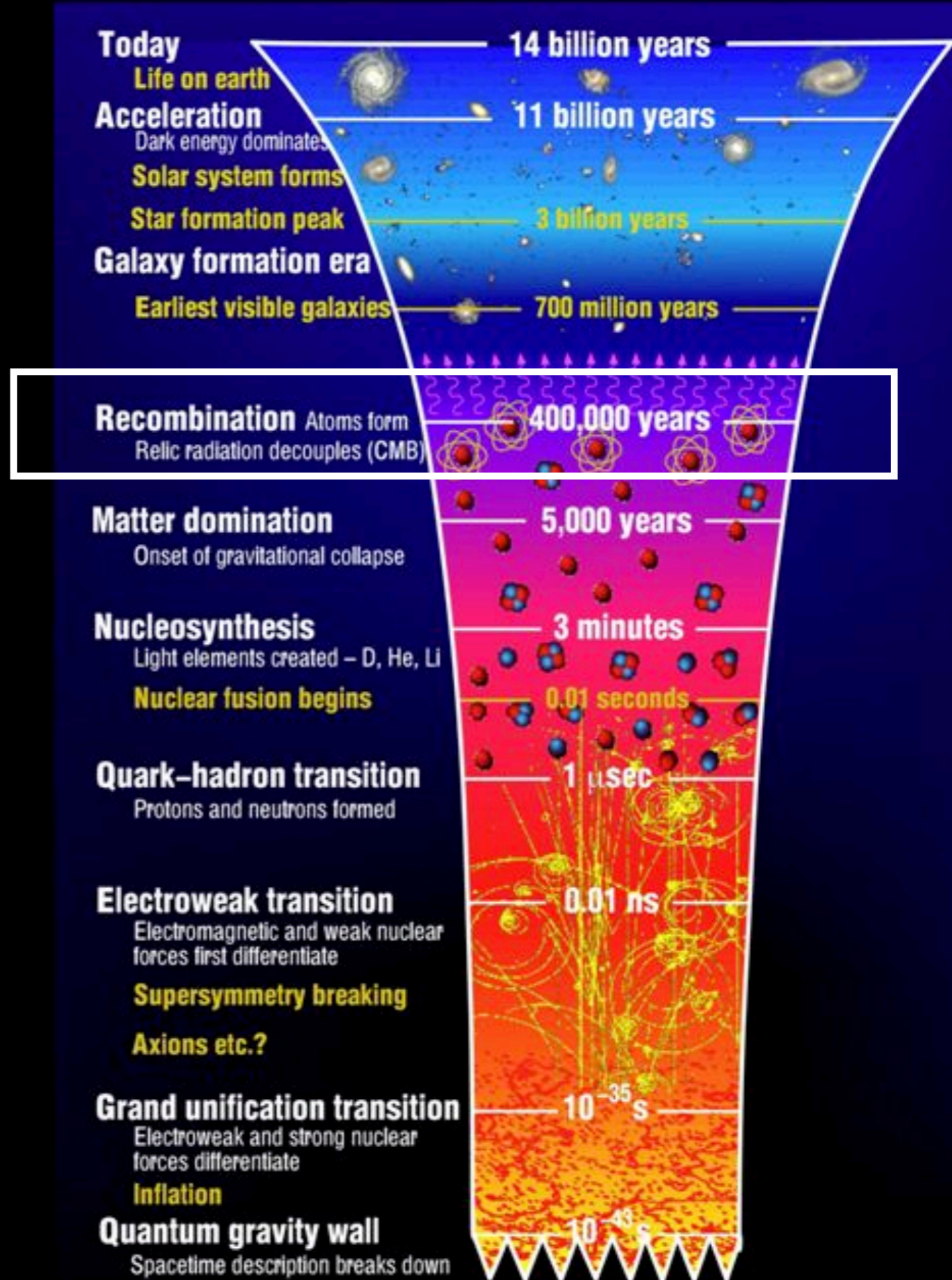


$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\mathcal{R} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$



- Hydrogen (74%)
- Helium (24%)
- other (2%)





Georges Gamow



Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

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

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed

We may remark at first that the building-up process is apparently completed when the temperature of the gas was still rather high, since the observed abundances would have been strongly affected by nuclear resonances in the region of the slow neutrons. In fact, as pointed out by Hughes,² the neutron capture cross sections of many elements (for neutron energies of about 1 e.v.) increase exponentially with atomic number in a periodic system, remaining approximately constant for elements of low atomic number.

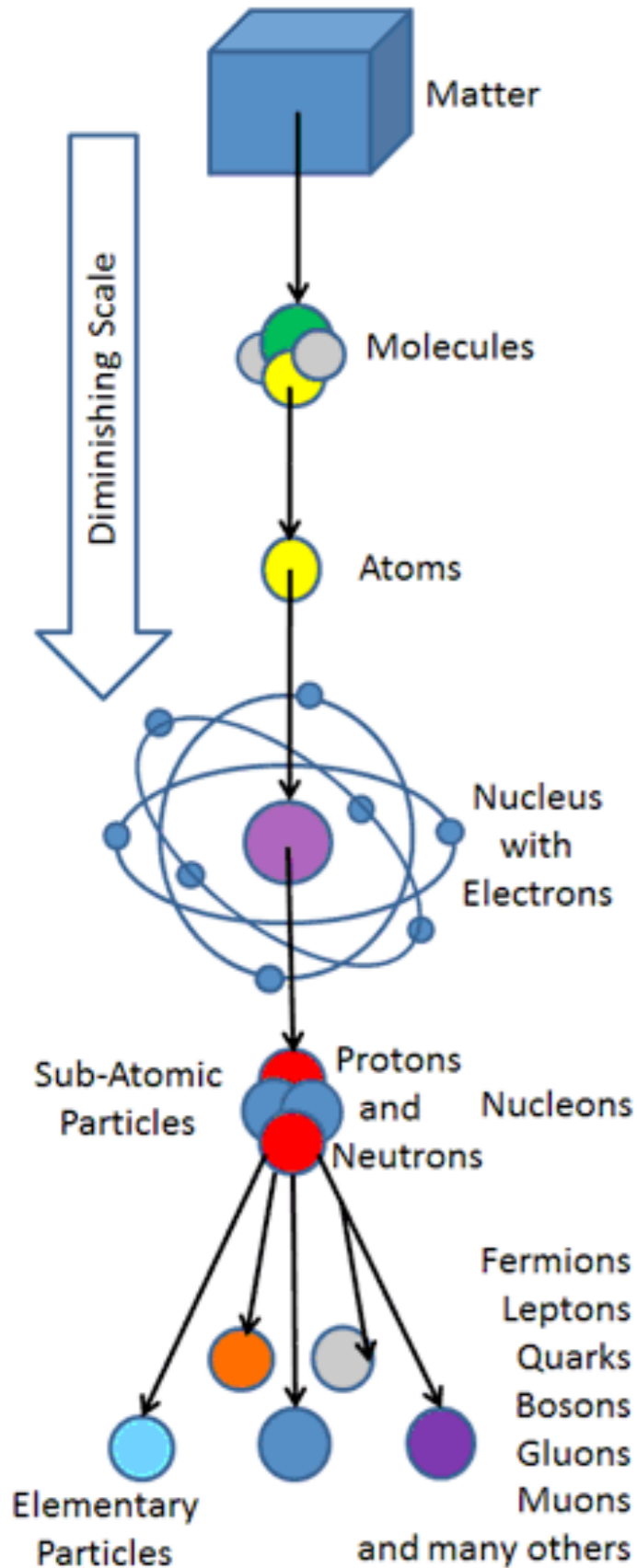
Using these cross sections, one can calculate the abundances of elements heavier than silver. In order to compare the calculated curve with the observed abundances, one must assume the integral of $\rho_n dt$ during the building-up process equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the picture of the expanding universe⁴ the density decreases as given by $\rho \cong 10^6/t^2$. Since the integral of $\rho_n dt$ diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 . The relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^6/t^2) dt \cong 5 \times 10^4$$

which gives us $t_0 \cong 20$ sec. and $\rho_0 \cong 2.5 \times 10^3$ g sec./cm³, the result may have two meanings: (a) for $t < t_0$ existing prior to that time the temperature of the gas was so high that no aggregation was possible; (b) the density of the universe never exceeded 2.5×10^3 g sec./cm³ which can possibly be

Particle Hierarchy

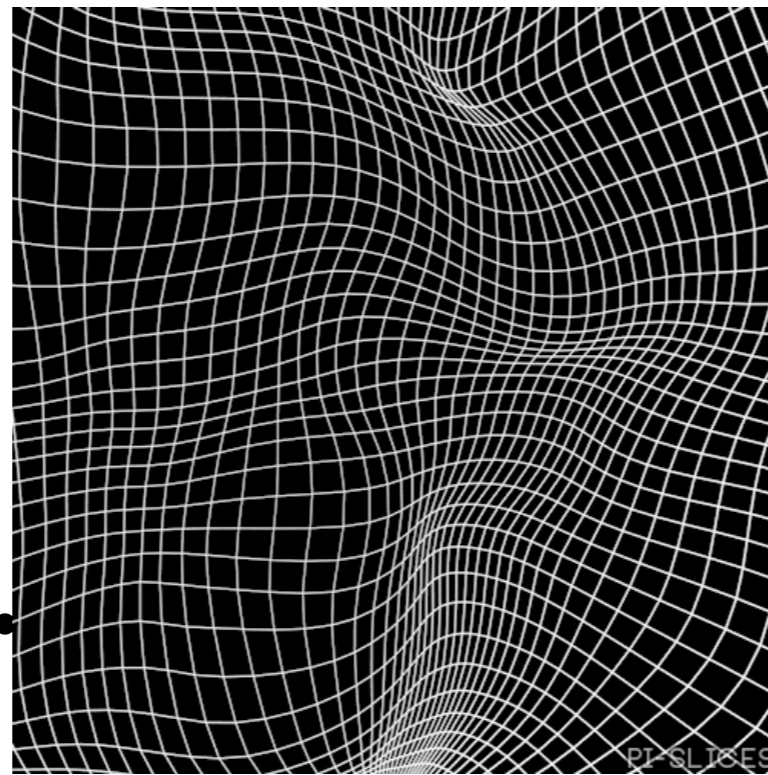


Pour comprendre la physique du plasma dense et chaud, il faut parler d'énergie/de température de liaison

	taille	énergie de liaison
atomes	10^{-10} m	10^3 K
noyaux	10^{-14} m	10^{10} K
protons et neutrons	10^{-15} m	10^{11} K
quarks	10^{-18} m	10^{13} K

L'énergie de liaison est fixée à partir des quatre forces fondamentales

- la gravité



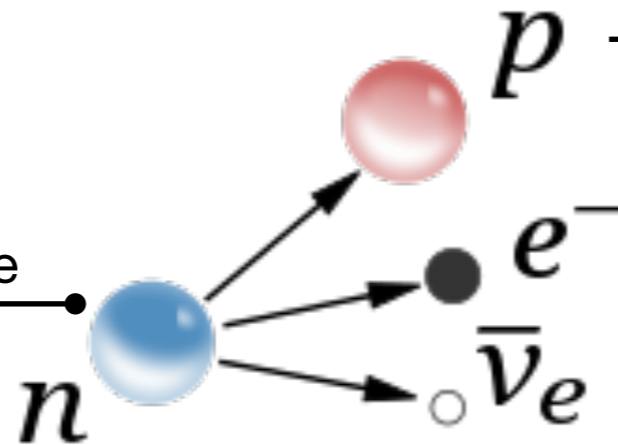
- la force électromagnétique

$\times 10^{39}$ plus forte
que la gravité



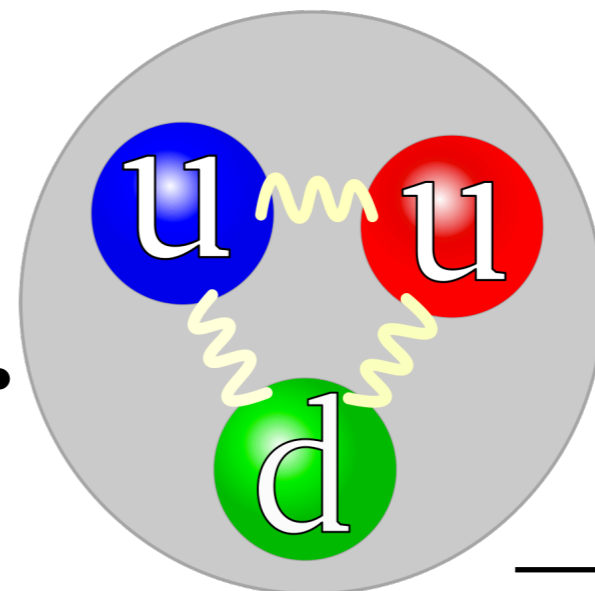
- la force faible

$\times 10^{28}$ plus forte
que la gravité



- la force forte

$\times 10^{41}$ plus forte
que la gravité



ces deux forces agissent sur les échelles atomiques $10^{-15}-10^{-18}\text{m}$

Temperature
of universe

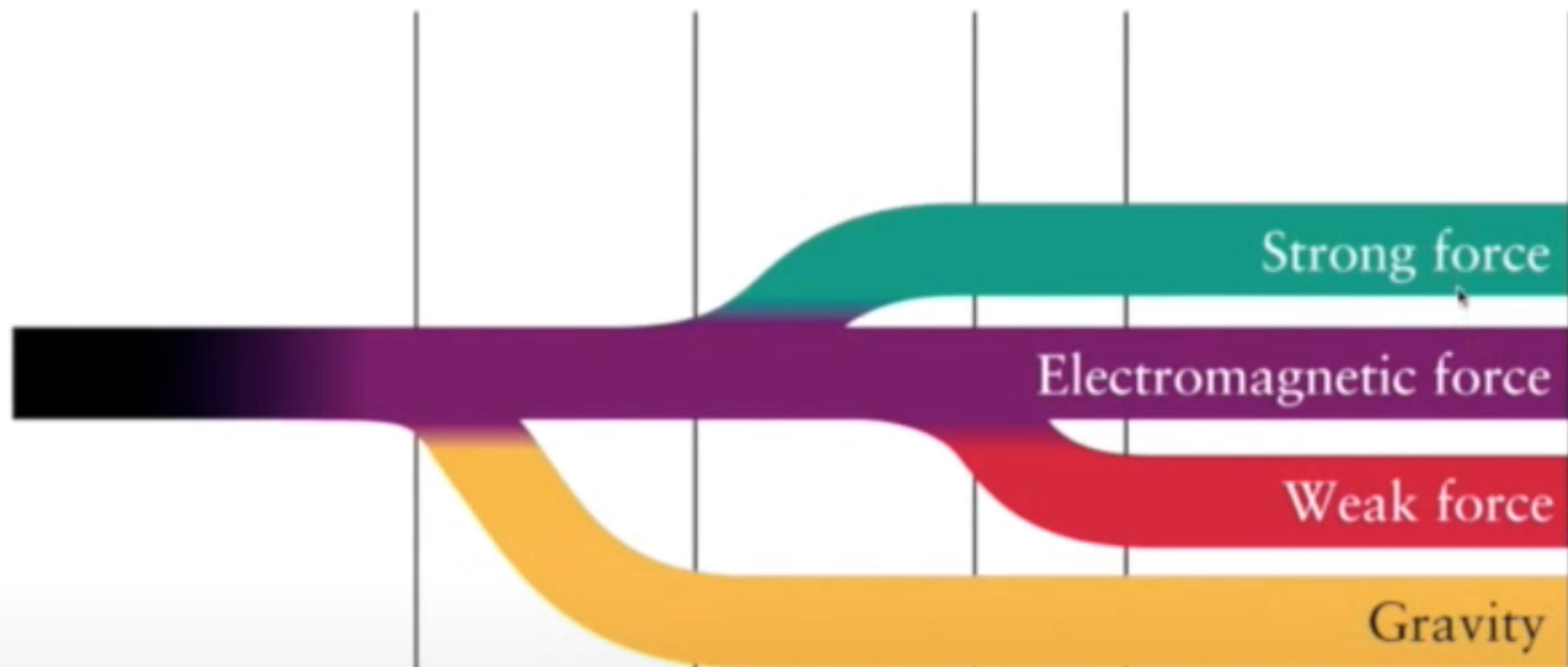
10^{32} K

10^{27} K

10^{15} K

10^{13} K

3 K



Time after
Big Bang

10^{-43} s

10^{-35} s

10^{-12} s

10^{-6} s

5×10^{17} s
(= now)

vidéo de Georges Lemaître

\\

arXiv:2301.07198 (*cross-listing*)

Date: Tue, 17 Jan 2023 21:23:49 GMT (91kb)

Title: Resurfaced 1964 VRT video interview of Georges Lemaître

Authors: Satya Gontcho A Gontcho, Jean-Baptiste Kikwaya Eluo and Paul Gabor

Categories: physics.hist-ph astro-ph.CO physics.pop-ph

Comments: VRT article linking the recovered footage:

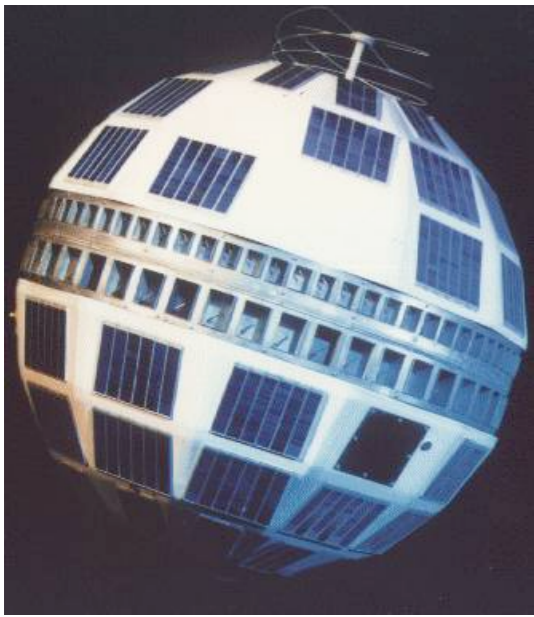
<https://www.vrt.be/vrtnws/fr/2022/12/31/la-vrt-a-retrouve-dans-ses-archives-une-interview-de-1964-de-geo/>

On December 31 2022, the Vlaamse Radio- en Televisieomroeporganisatie (VRT), the national public-service broadcaster for the Flemish Community of Belgium, recovered a video recording of a 1964 interview of Georges Lemaître. Up until now, that footage was thought to have been lost. This footage represents a unique insight into the views of the physicist often coined as the "father of the Big Bang". The interview was conducted in French and is available online with Flemish subtitles. In an effort to make this treasure broadly available, we provide in this paper some brief context, an English translation of the interview as well as the French transcript for reference. (<https://arxiv.org/abs/2301.07198> , 91kb)



A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and nodes. The filaments are interconnected, forming a web-like structure. Numerous bright orange and yellow points are scattered throughout, representing galaxies and galaxy clusters. The background is dark, making the blue filaments and orange points stand out.

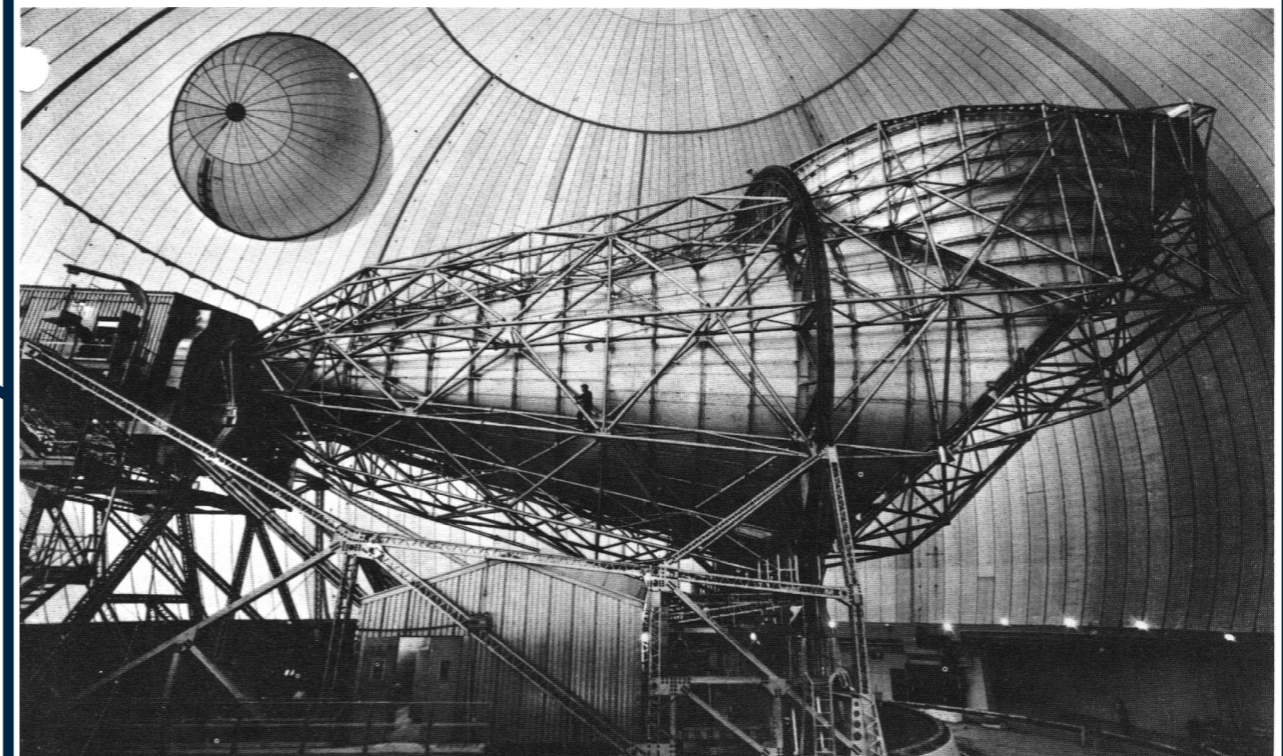
Le rayonnement fossile



Telstar 1

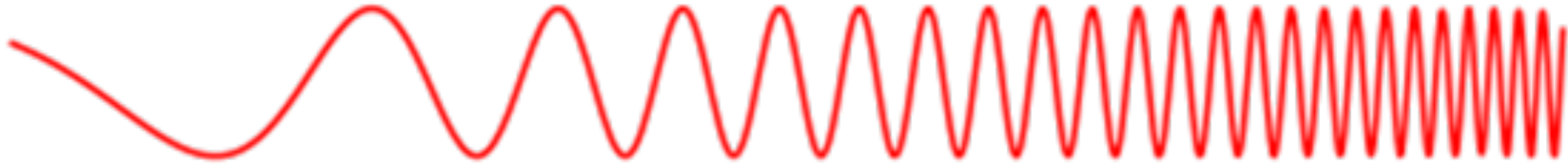


L'antenne PB1 (France)



L'antenne d'Andover (Maine, USA)

Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type
Wavelength (m)

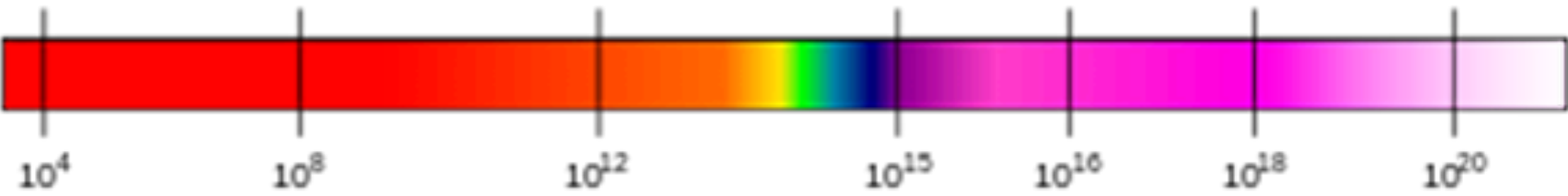
Radio 10^3	Microwave 10^{-2}	Infrared 10^{-5}	Visible 0.5×10^{-6}	Ultraviolet 10^{-8}	X-ray 10^{-10}	Gamma ray 10^{-12}
------------------------	-------------------------------	------------------------------	--	---------------------------------	----------------------------	--------------------------------

Approximate Scale
of Wavelength

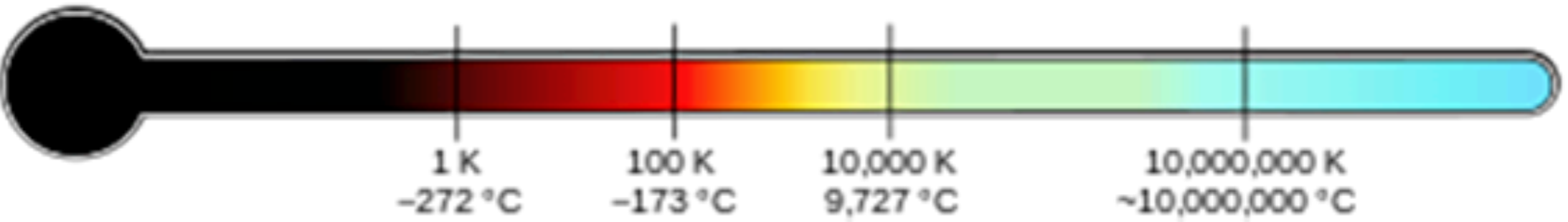


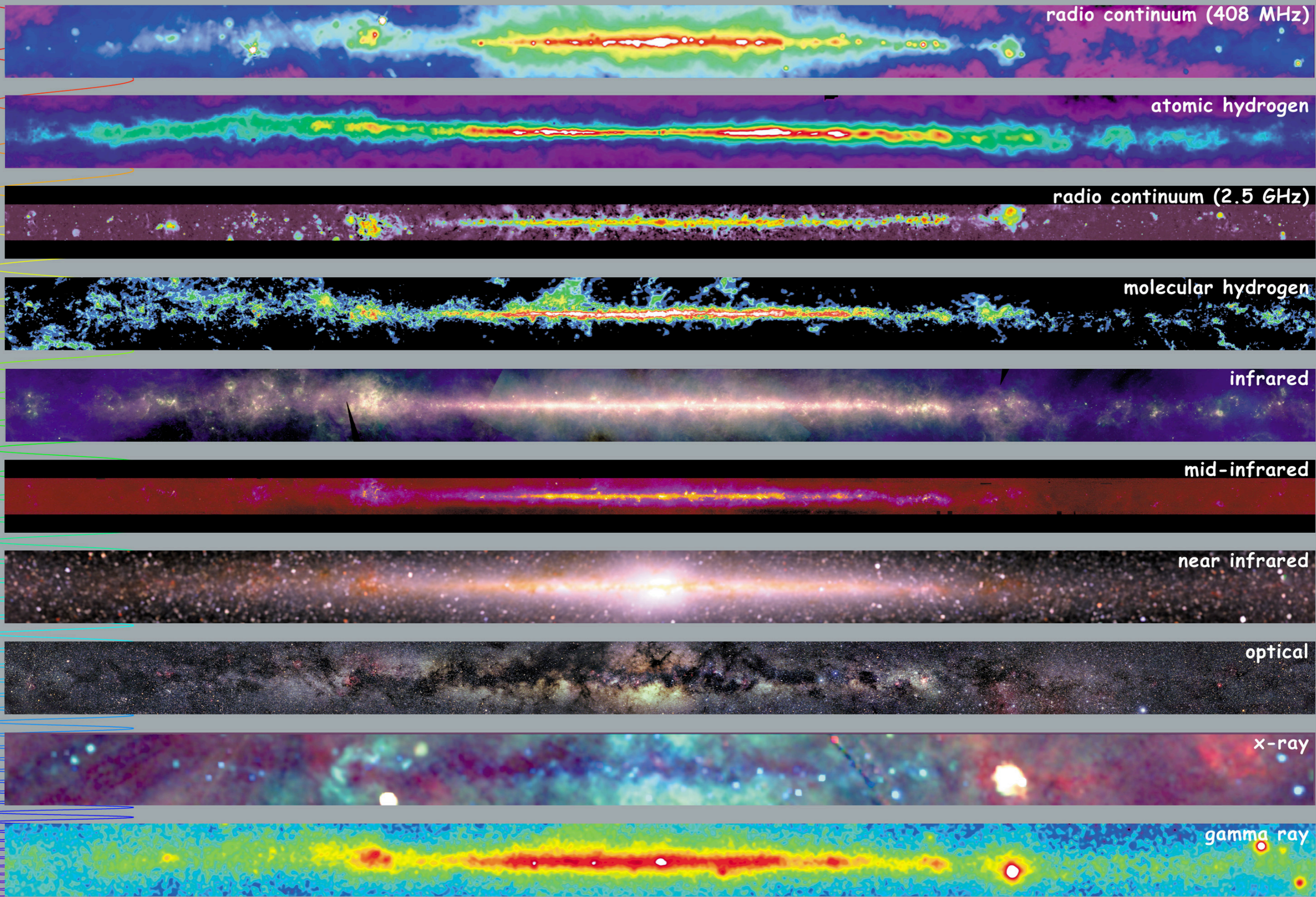
Buildings	Humans	Butterflies	Needle Point	Protozoans	Molecules	Atoms	Atomic Nuclei
-----------	--------	-------------	--------------	------------	-----------	-------	---------------

Frequency (Hz)

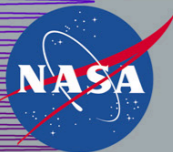


Temperature of
objects at which
this radiation is the
most intense
wavelength emitted





<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



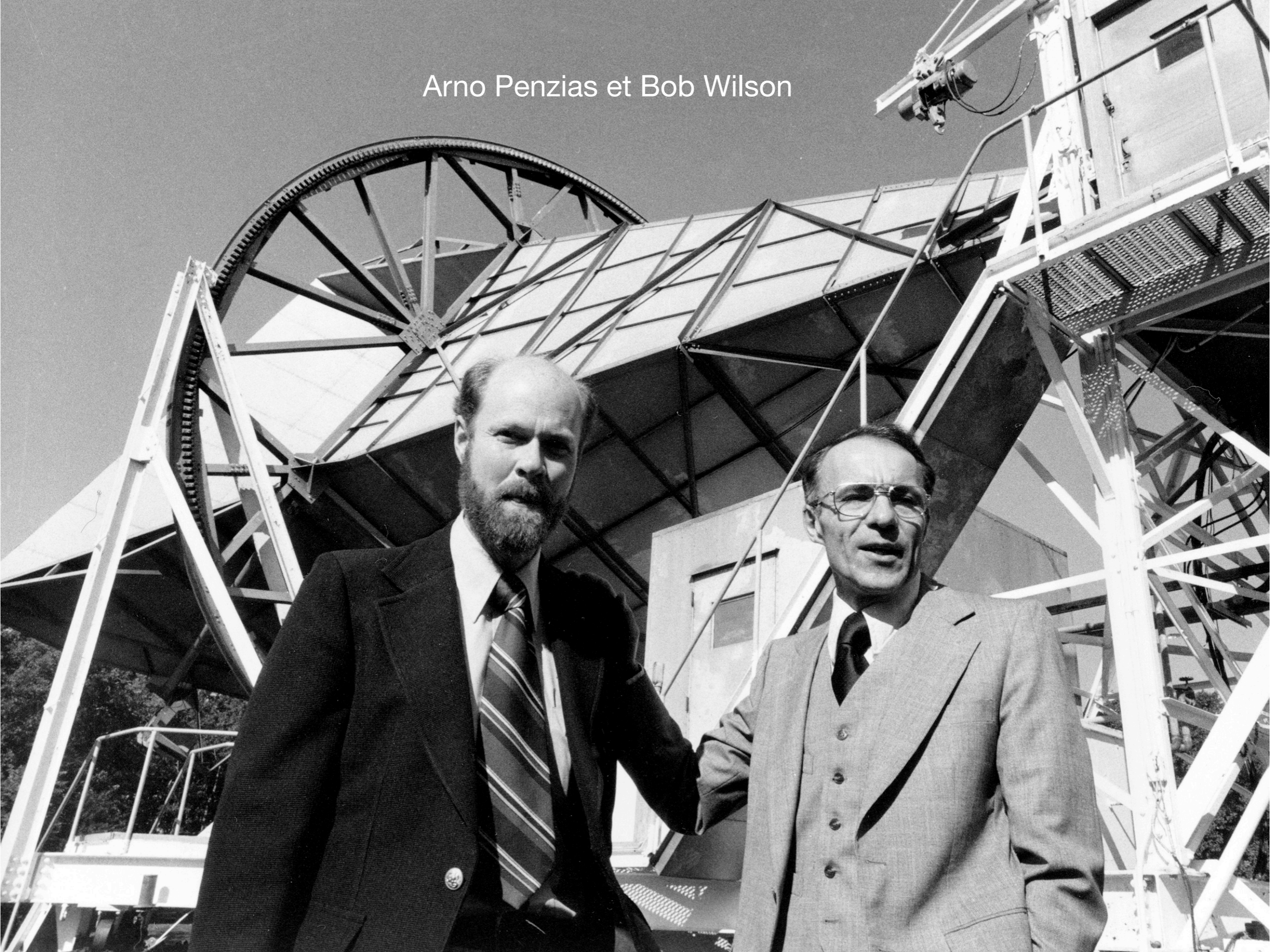
Multiwavelength Milky Way



1964-65

Josquin Errard, APC / CNRS, Teaching the Universe 2023

Arno Penzias et Bob Wilson

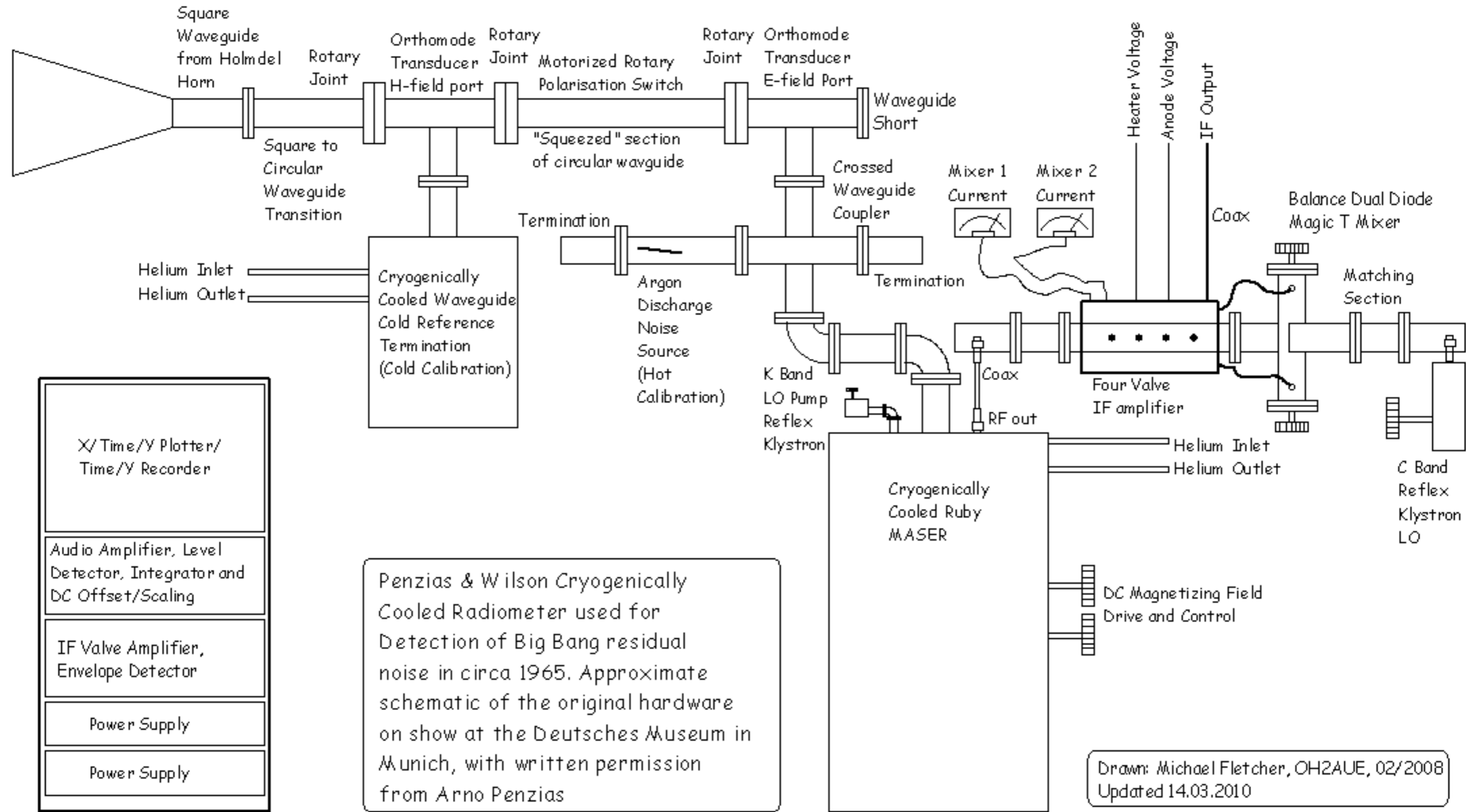


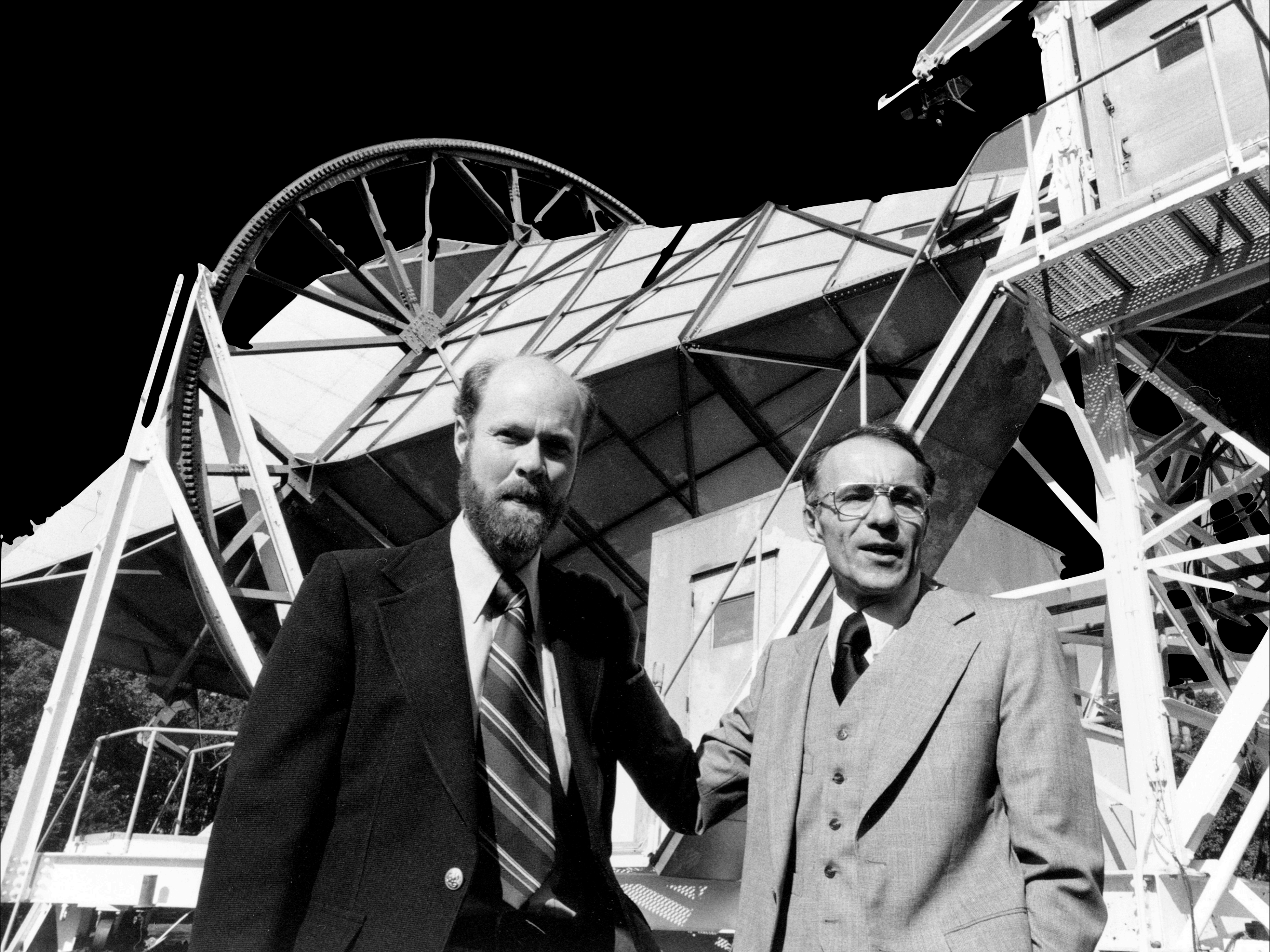
Penzias & Wilson / Bell Labs Receiver at Deutsches Museum

$\nu \sim 4\text{GHz}$

$\lambda \sim 7\text{cm}$







le ciel n'est pas noir!





**View from inside the 20-foot Holmdel horn
Cleaning the antenna**

well, boys, we have
been scooped!



Holmdel Horn Antenna



Late 1964 – Connection Made

Telephone call from Bell Labs to Princeton: Bob Dicke, “Well, boys, we’ve been scooped.”

Dicke, Peebles, Roll and Wilkinson (1965) offer an explanation of the Bell Labs results:

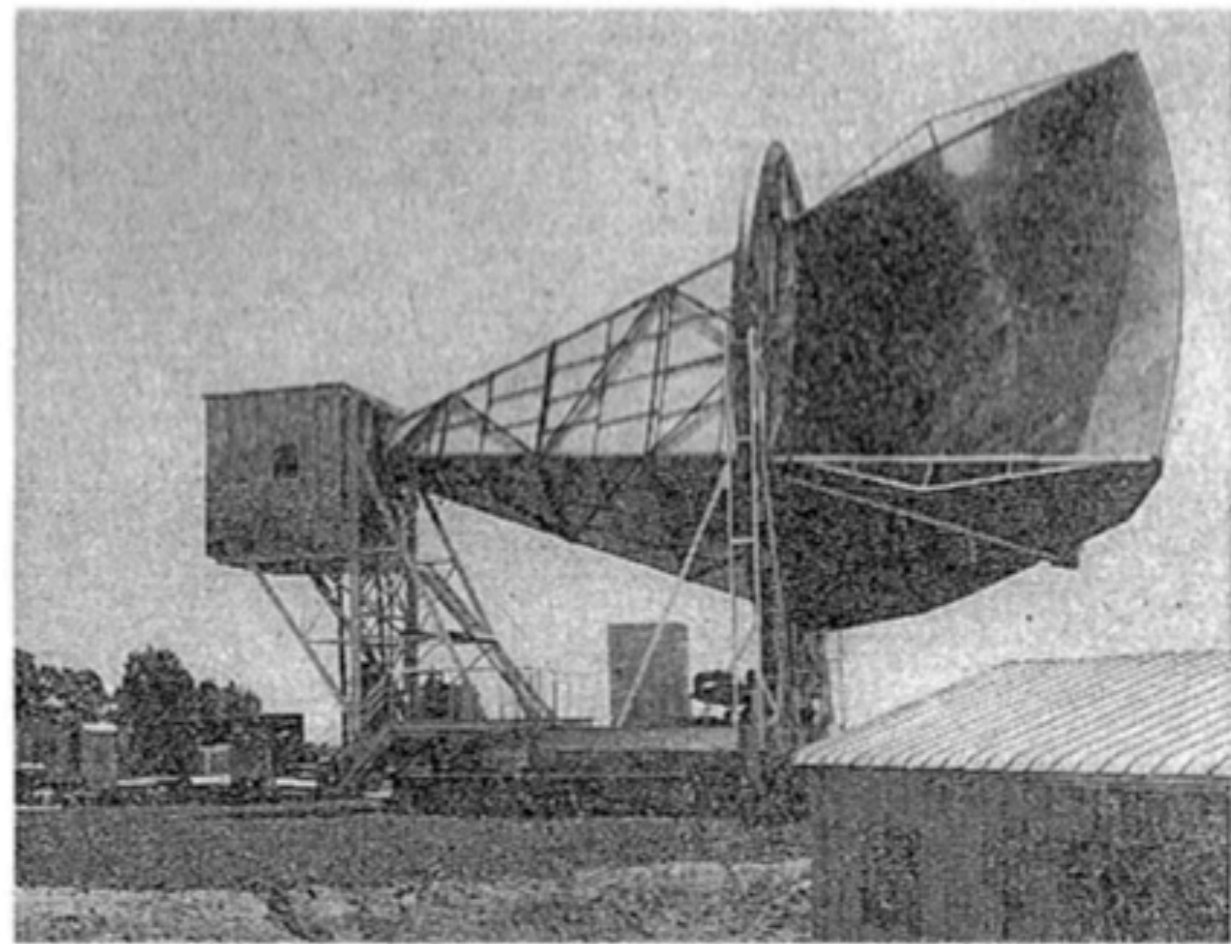
Conclusions. While all the data are not yet in hand we propose to present here the possible conclusions to be drawn if we tentatively assume that the measurements of Penzias and Wilson (1965) do indicate black body radiation at 3.5°K . We also assume that the universe can be considered to be isotropic and uniform, and that the present energy density in gravitational radiation is a small part of the whole. Wheeler (1958) has remarked that gravitational radiation could be important.



Arno Penzias &
Bob Wilson



Signals Imply a 'Big Bang' Universe



Horn antenna, used in space exploration, at the Bell Laboratories in Holmdel, N. J.

By WALTER SULLIVAN

Scientists at the Bell Telephone Laboratories have observed what a group at Princeton University believes may be remnants of an explosion that gave birth to the universe.

These remnants are thought to have originated in the burst of light from that cataclysmic event.

Such a primordial explosion is embodied in the "big bang" theory of the universe. It seeks to explain the observa-

tion that virtually all distant galaxies are flying away from the earth. Their motion implies that they all originated at a single point 10 or 15 billion years ago.

The Bell observations, made by Drs. Arno A. Penzias and Robert W. Wilson from a hilltop in Holmdel, N. J., were of radio waves that appear to be flying in all directions through the universe. Since radio waves and light waves are identical, except for their wavelength, these are thought

to be remnants of light waves from the primordial flash.

The waves were stretched into radio waves by the vast expansion of the universe that has occurred since the explosion and release of the waves from the expanding gas cloud born of the fireball.

In what may prove to be one of the most remarkable coincidences in scientific history, the existence of such waves was predicted at

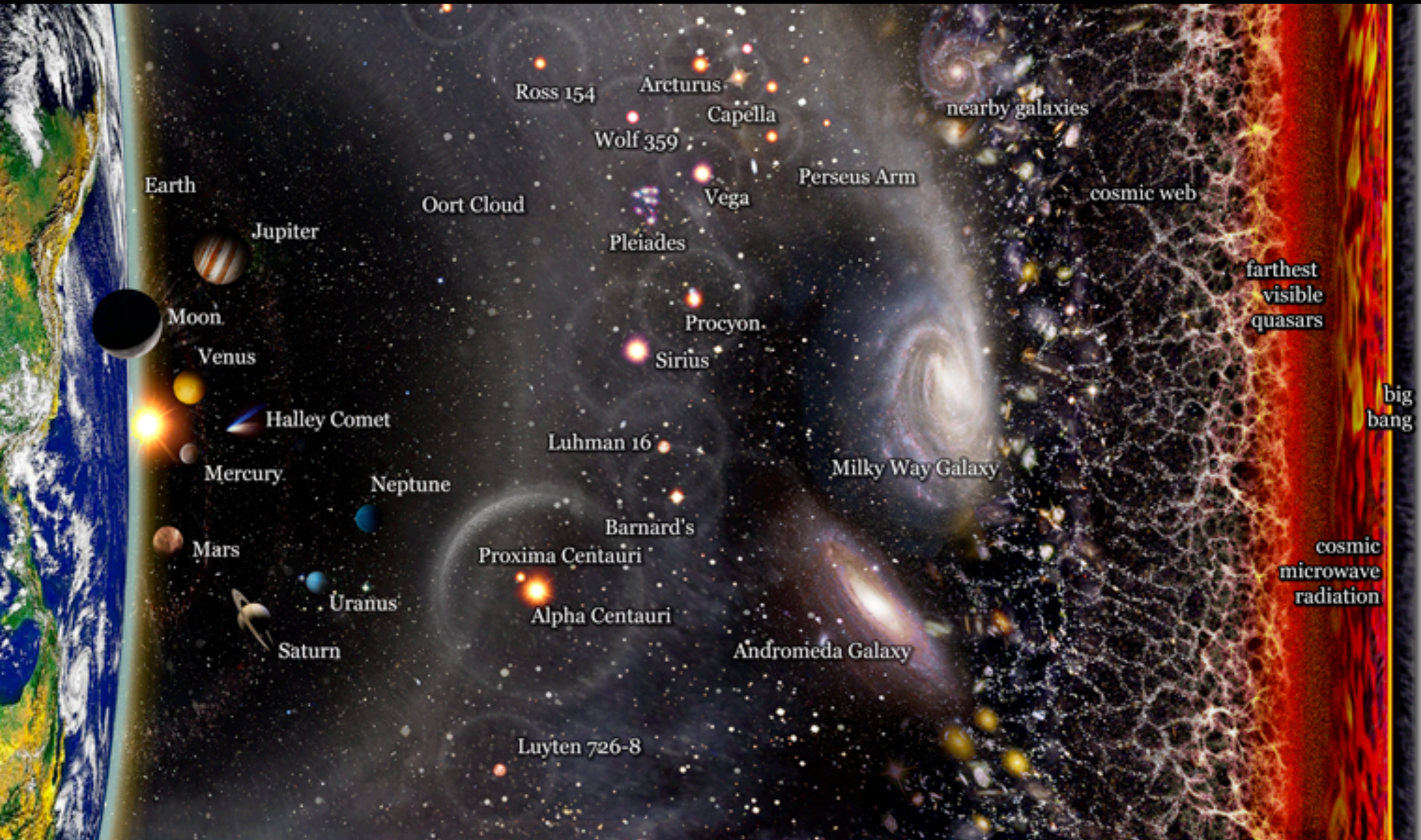
Continued on Page 18, Column 1

The New York Times

Published: May 21, 1965

Copyright © The New York Times

l'Univers à 2 dimensions



distance = temps

Le rayonnement fossile

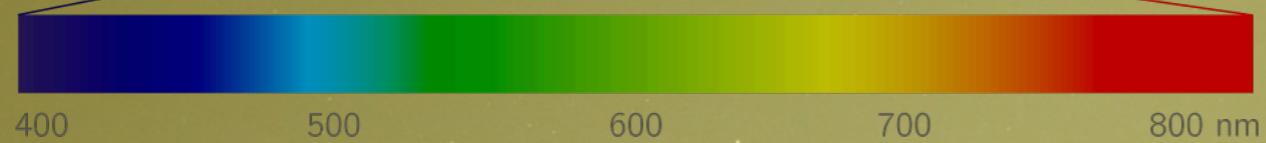
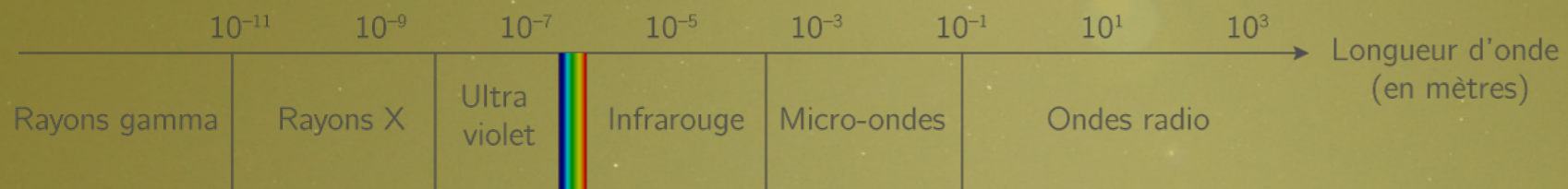


Chajnantor Plateau, 5,200m, Atacama desert, Chile. Credits: NHK

Le rayonnement fossile



Rayonnement fossile, écho du Big Bang



Spectre visible



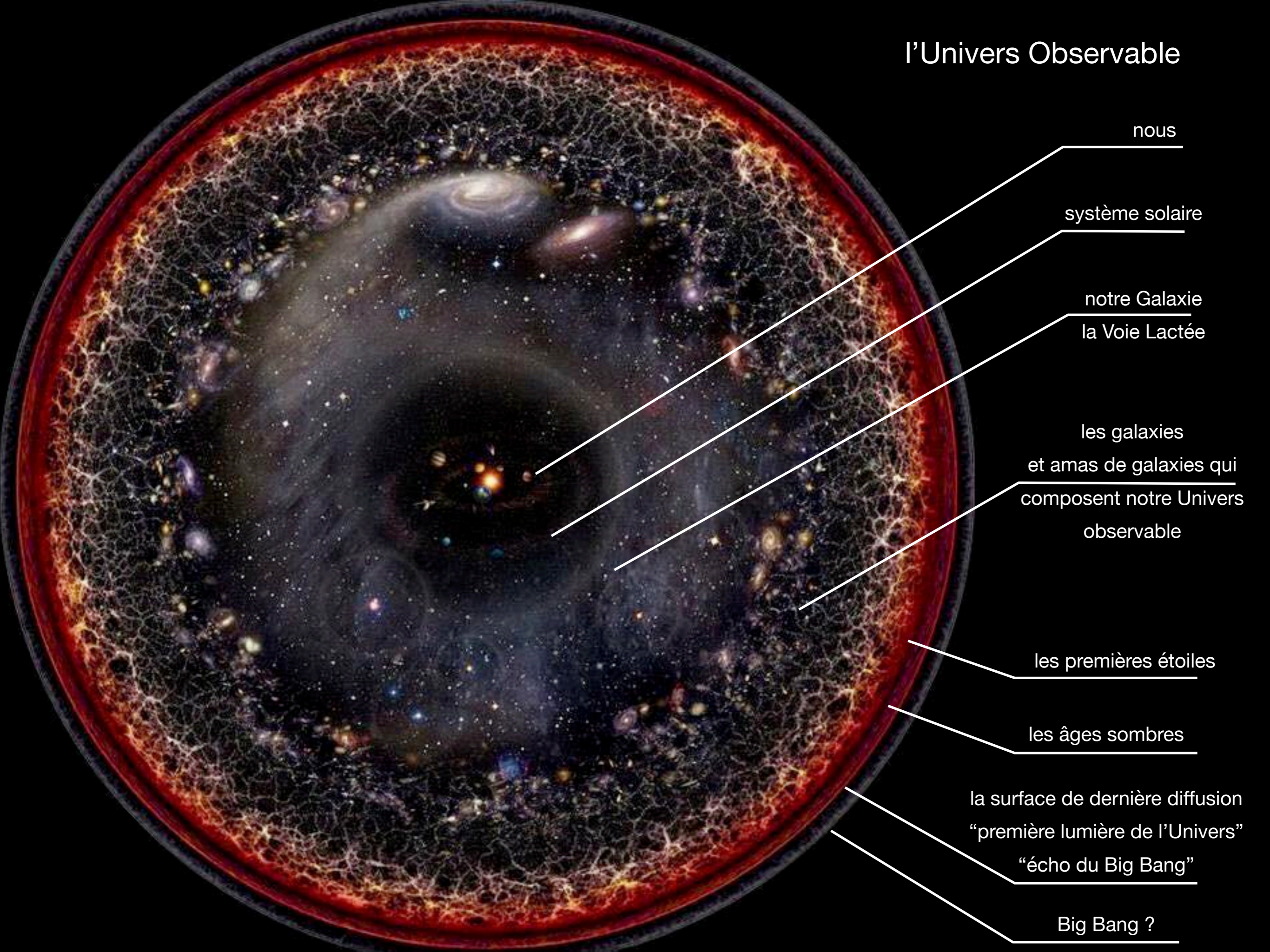
à ~ mi-distance entre nous et la surface de dernière diffusion



dans notre environnement local



l'Univers Observable



nous

système solaire

notre Galaxie
la Voie Lactée

les galaxies
et amas de galaxies qui
composent notre Univers
observable

les premières étoiles

les âges sombres

la surface de dernière diffusion
"première lumière de l'Univers"
"écho du Big Bang"

Big Bang ?

TIME = ZERO: BIG BANG

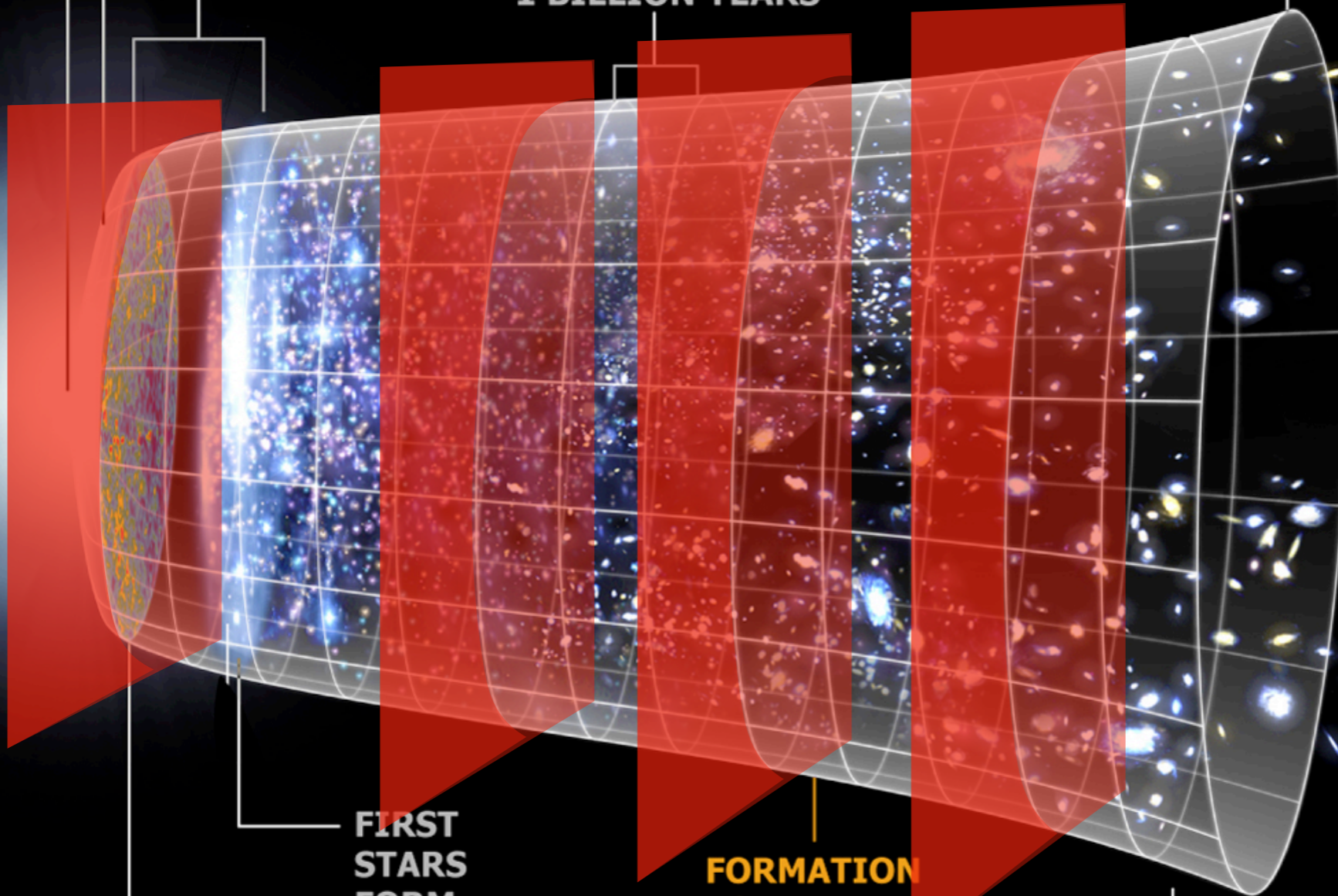
$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

INFLATION

DARK AGES

1 BILLION YEARS

TIME = NOW

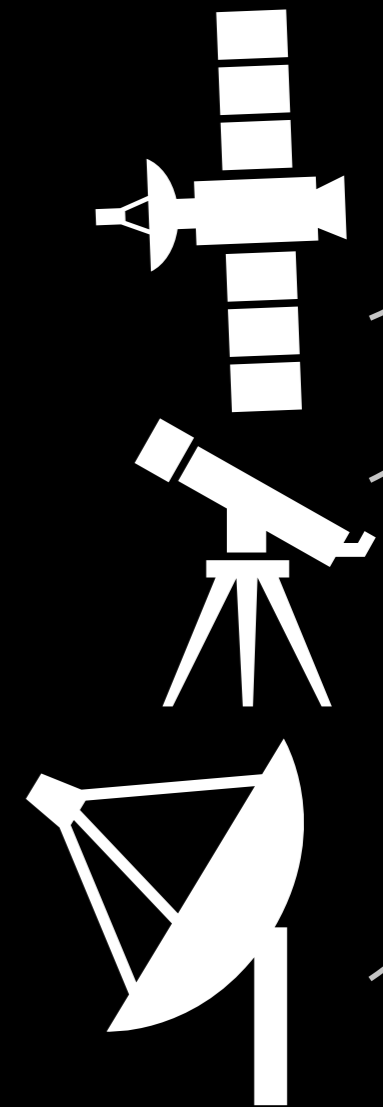


FIRST STARS FORM

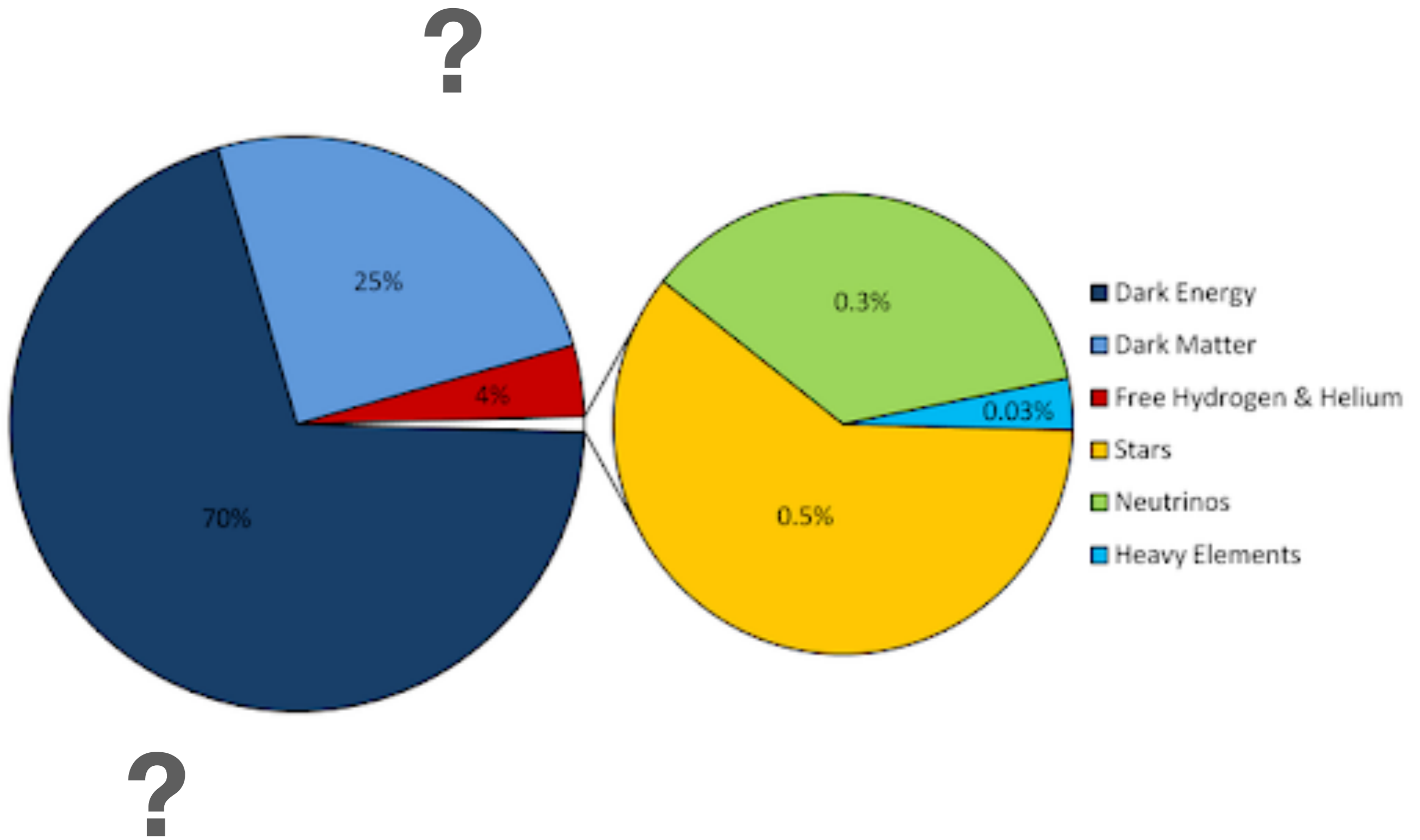
FORMATION OF EARTH

QUARK SOUP, EMISSION OF COSMIC RADIATION

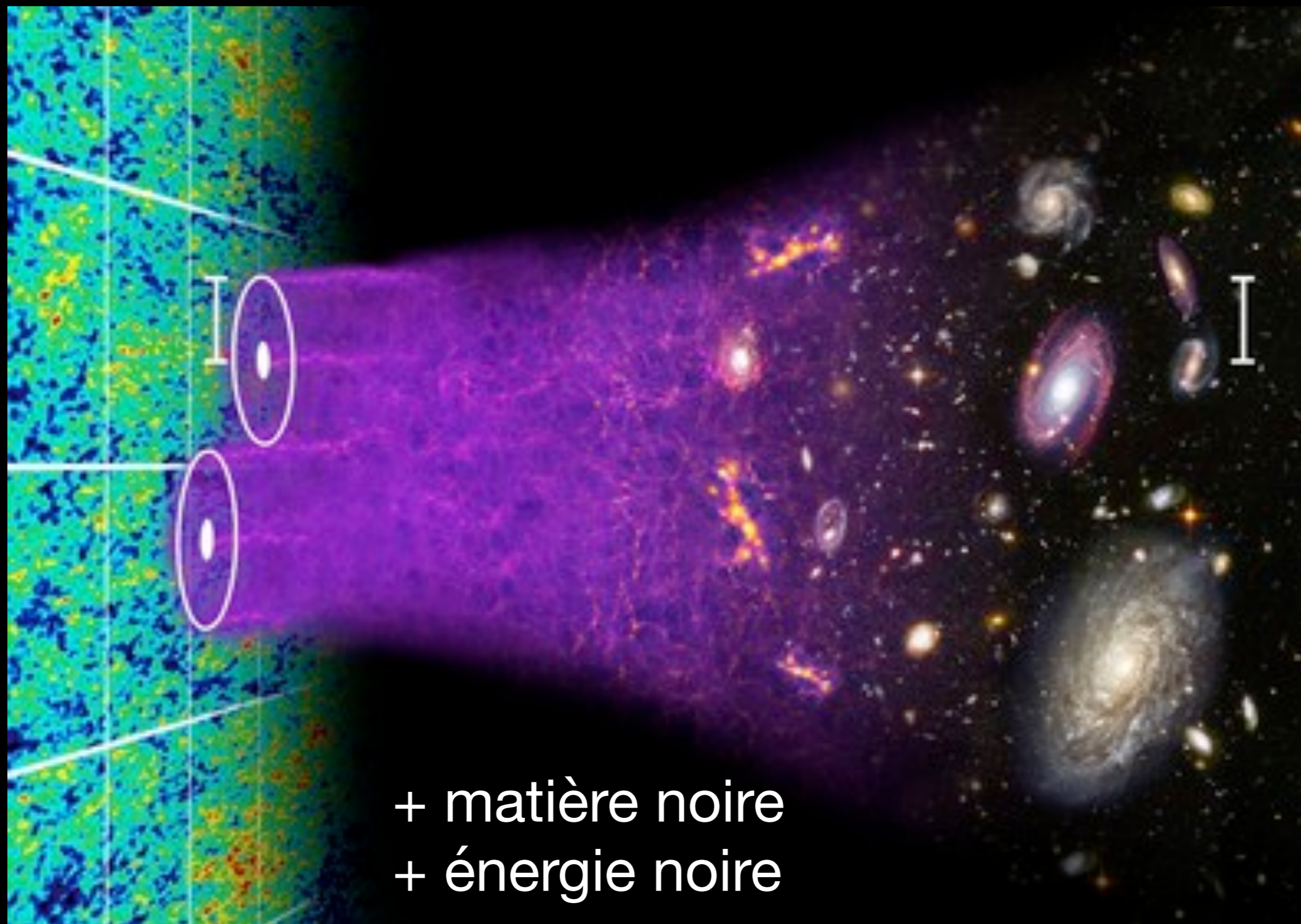
ACCELERATING EXPANSION



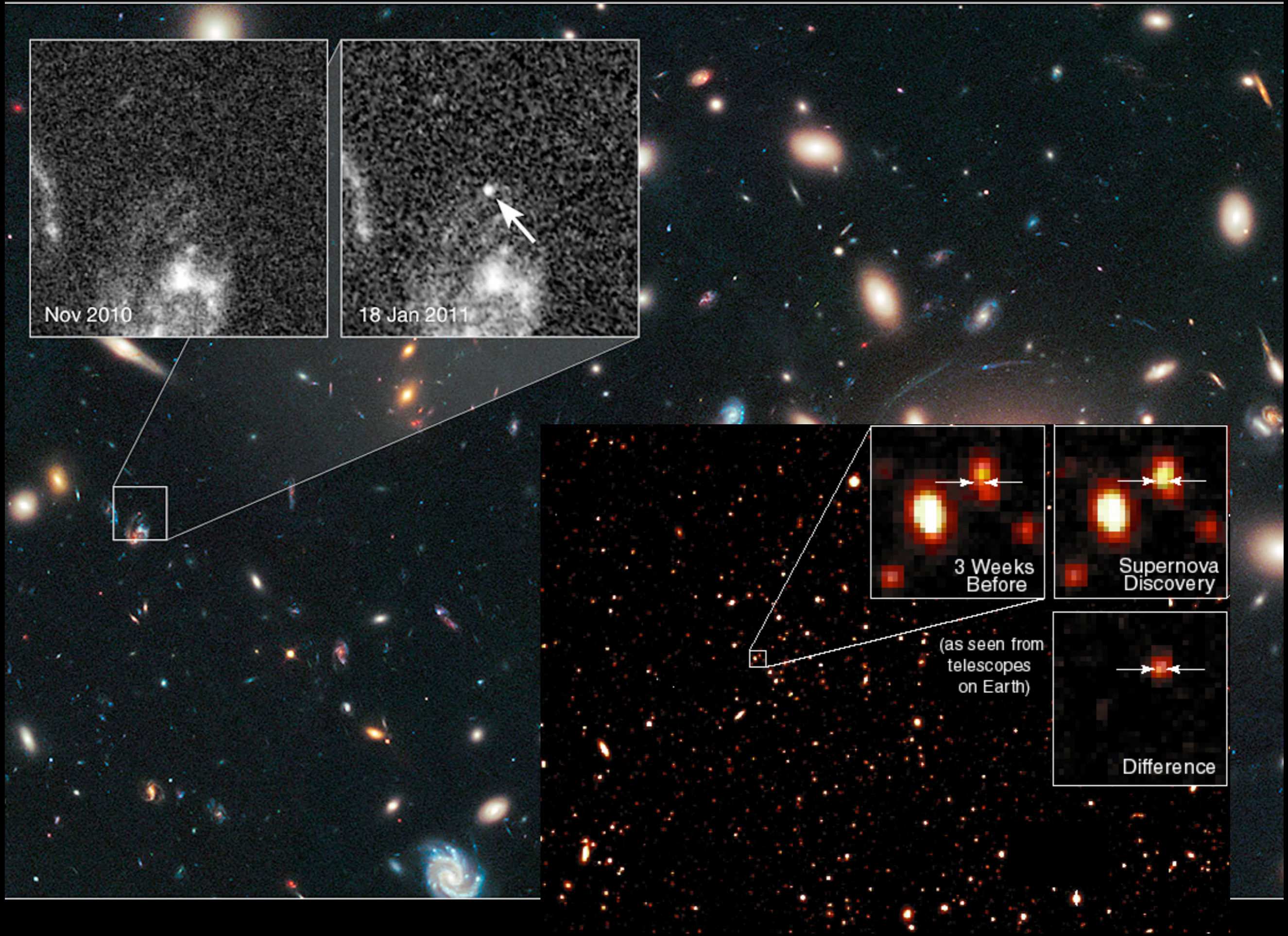
13.7 BILLION YEARS



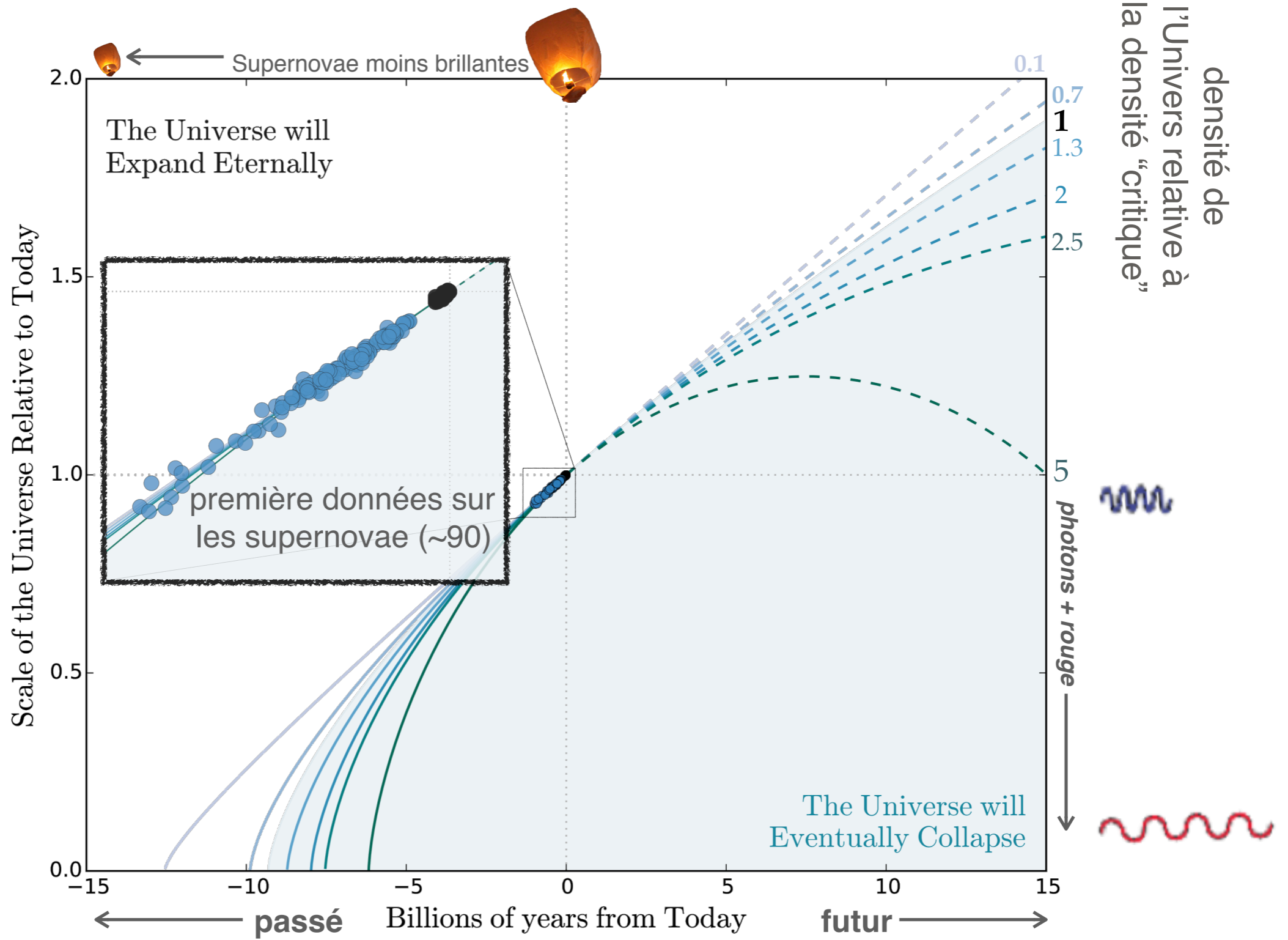
temps



+ matière noire
+ énergie noire

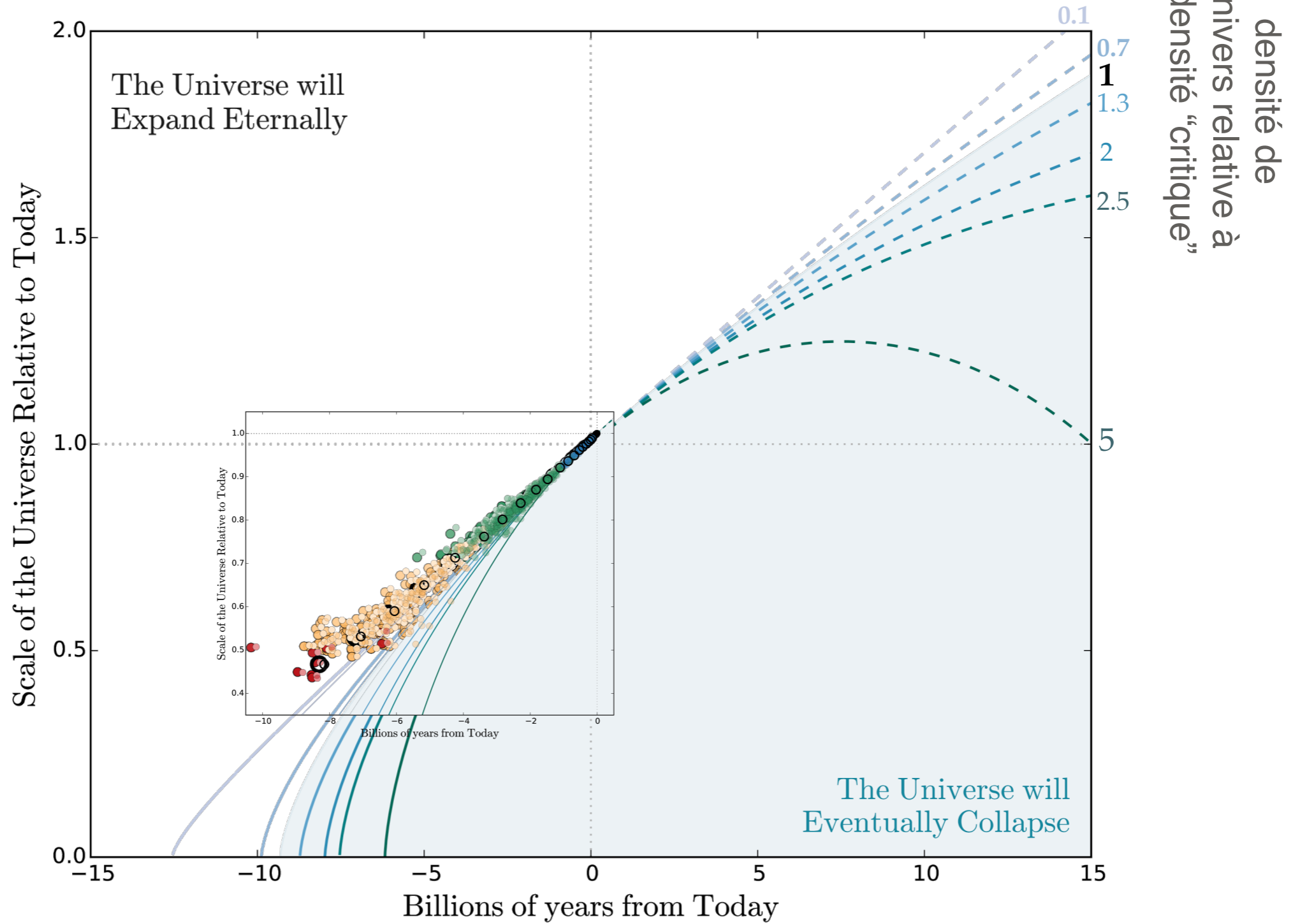


Observations des Supernovae

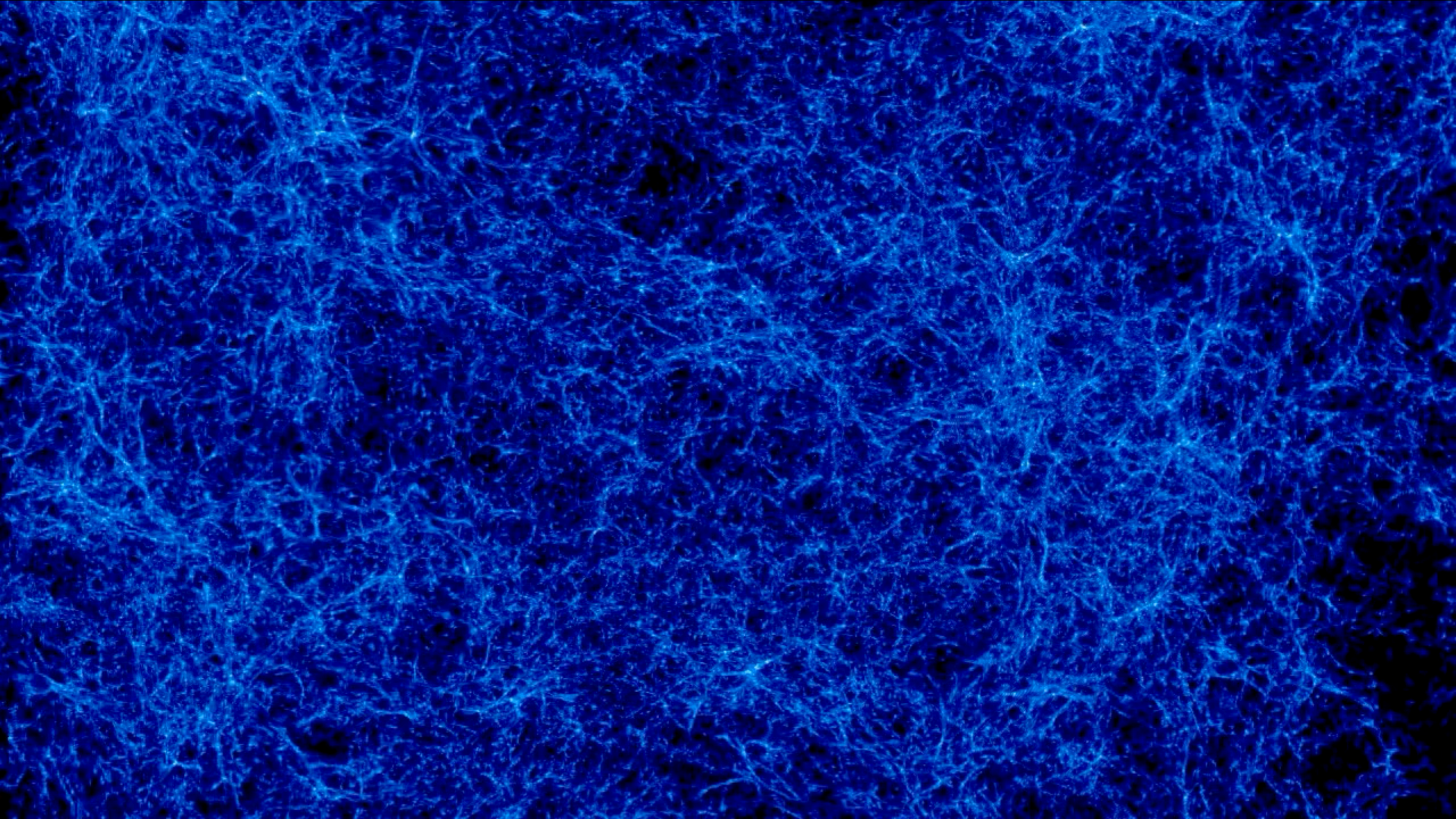


crédits : M. Rigault

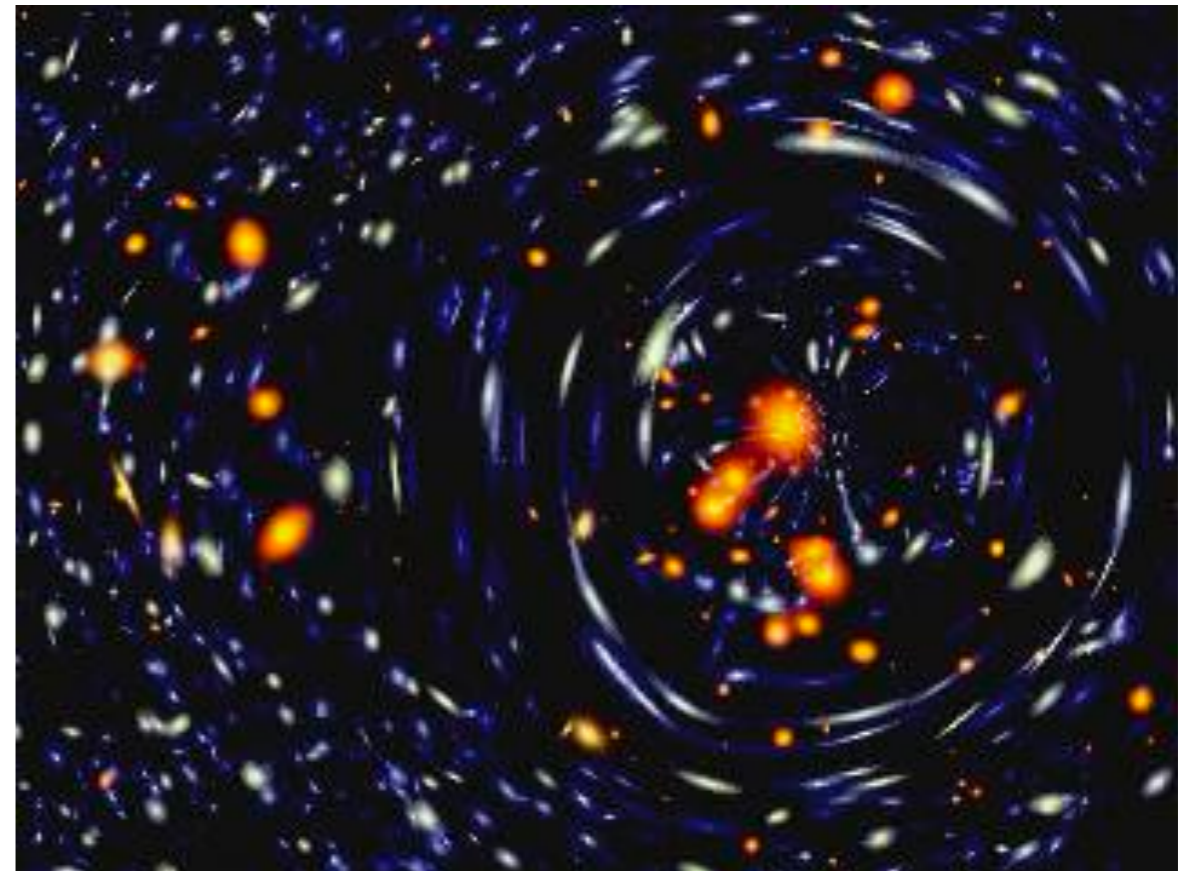
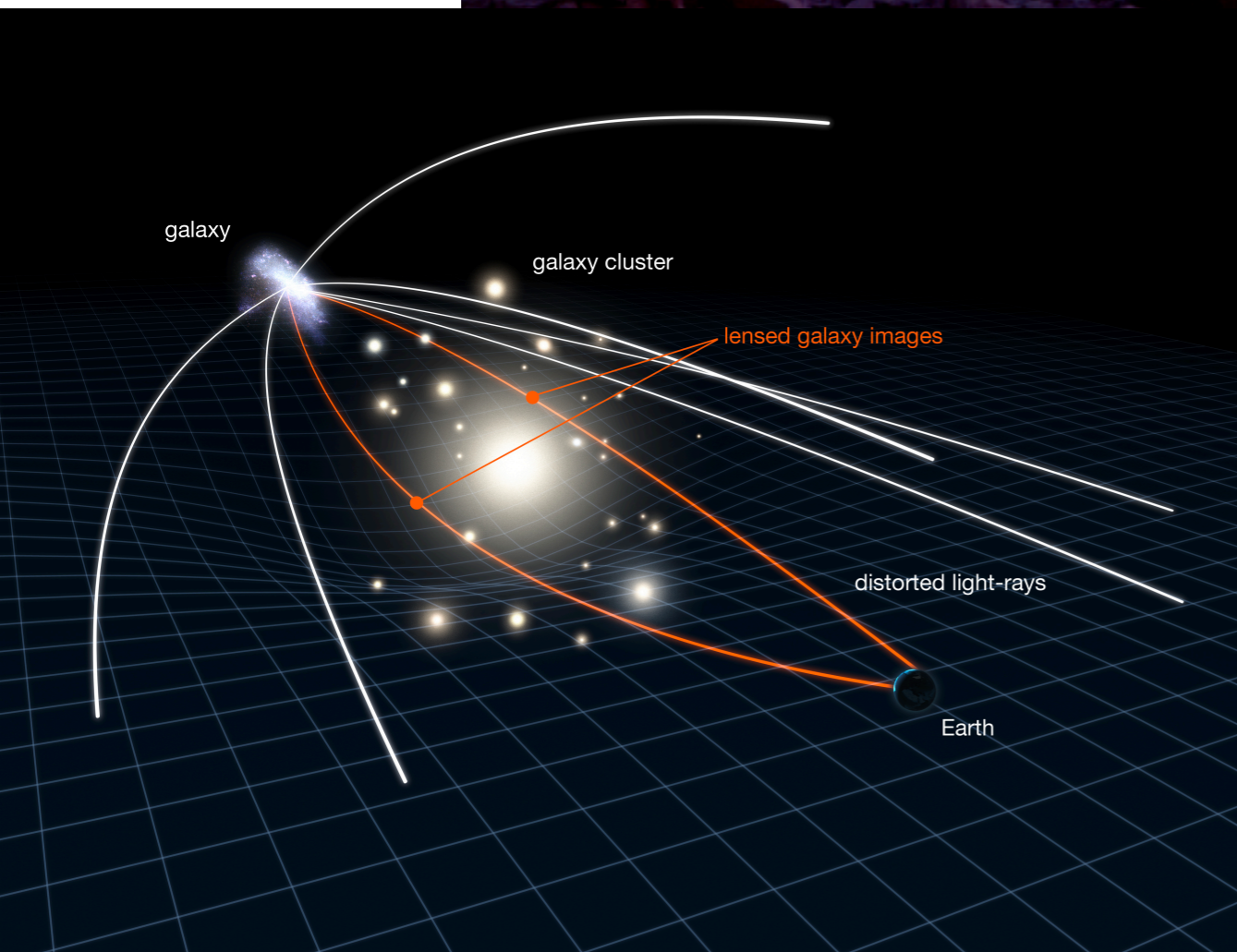
Observations des Supernovae



crédits : M. Rigault



matière noire et énergie sombre sont des ingrédients nécessaires



A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and nodes. The nodes are represented by bright orange and yellow clusters of galaxies, while the filaments are thin, blue, thread-like structures. The background is a deep black, making the blue and orange colors stand out. The overall structure is a dense, interconnected web of matter.

La recherche des origines aujourd'hui

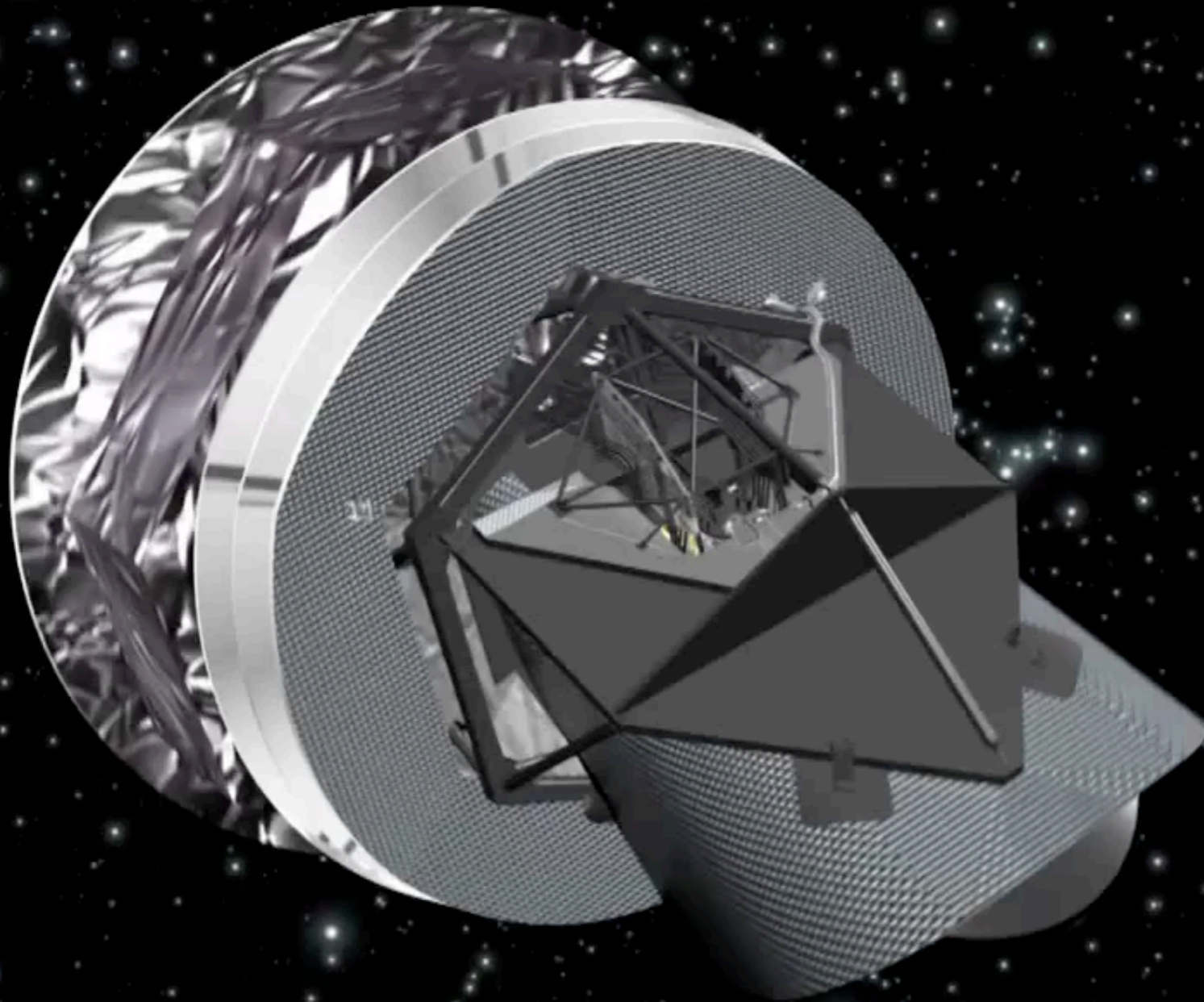
arianespace

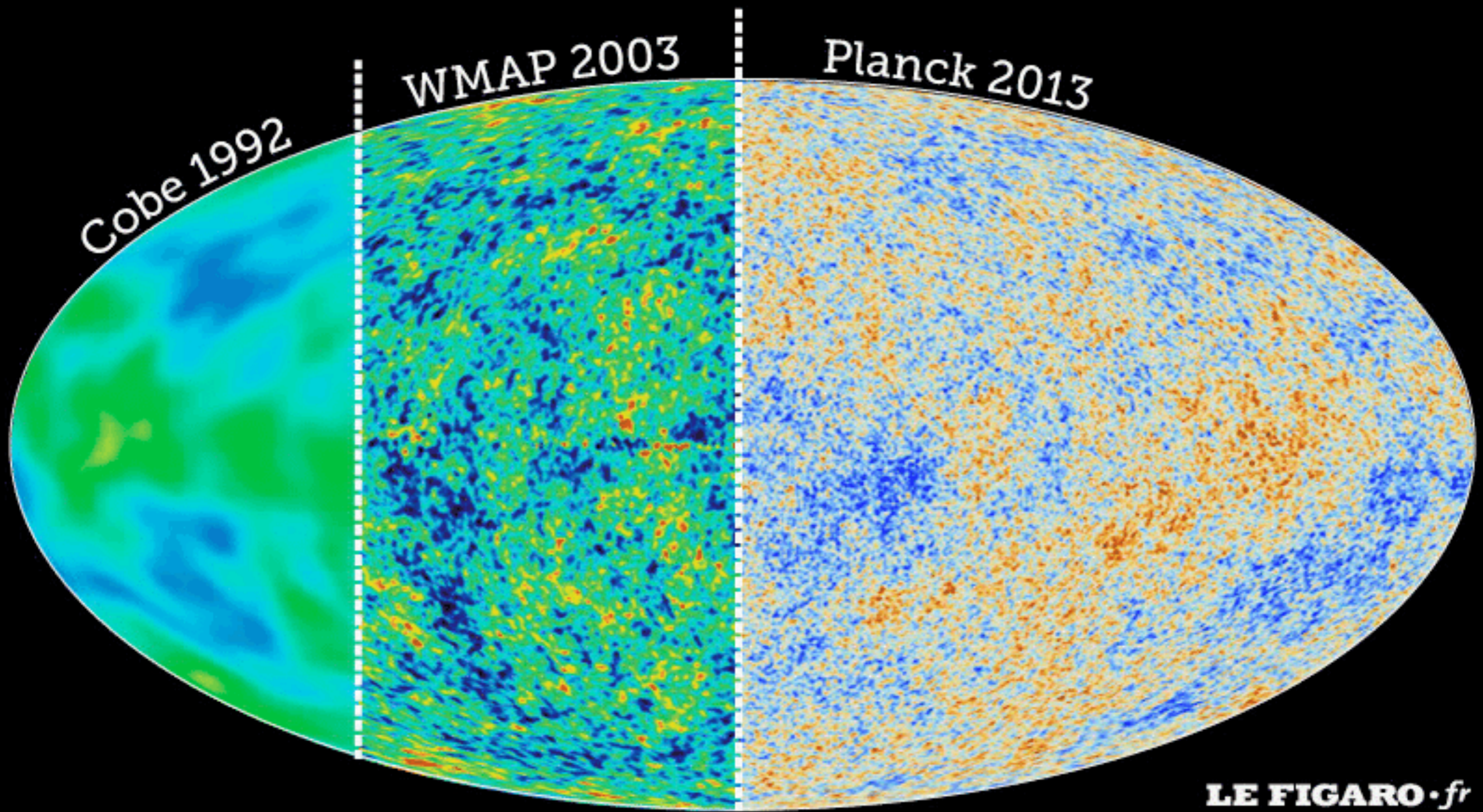
**lancement
de Planck
(Sep 2009)**

esa
ariane

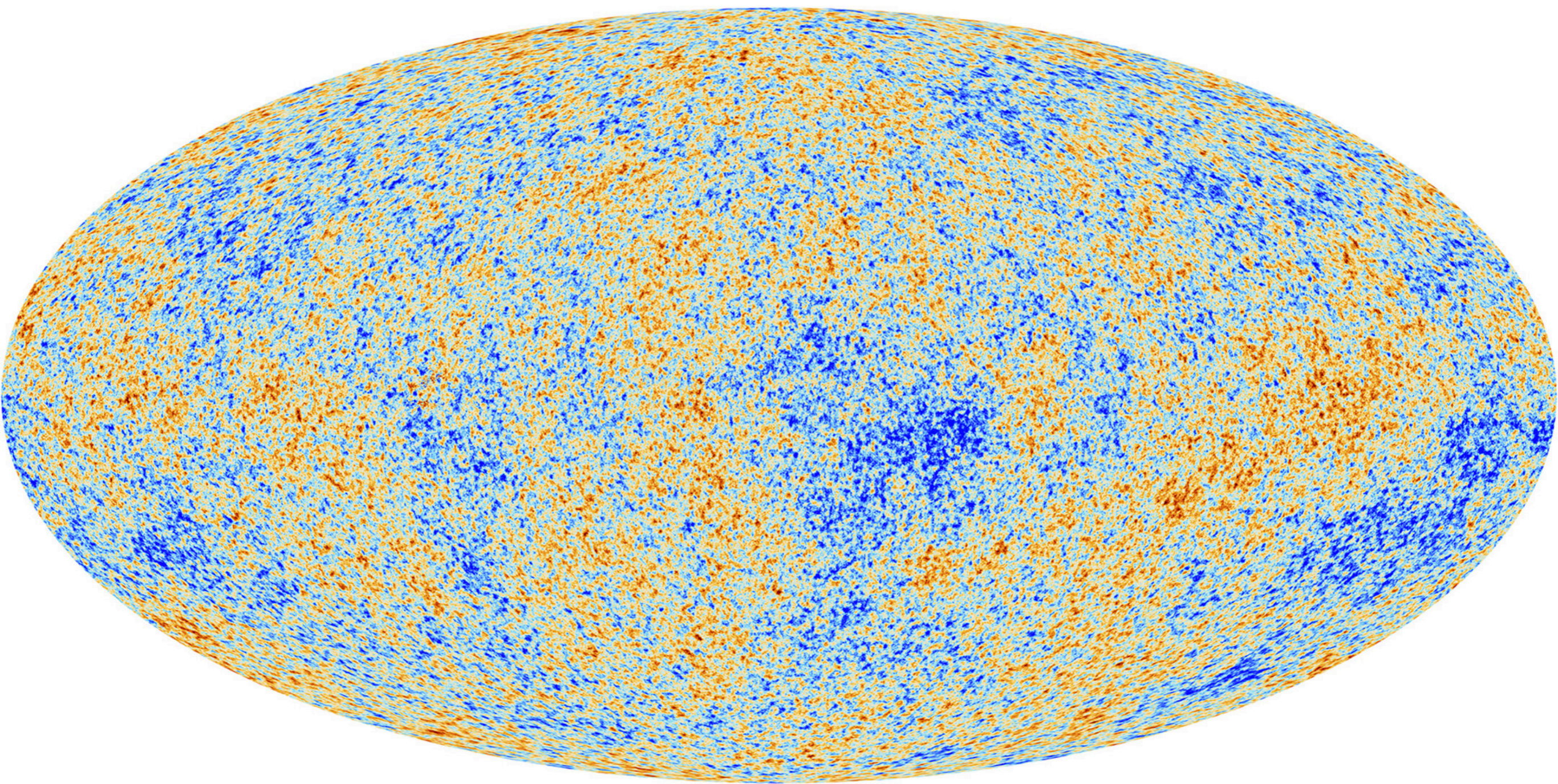


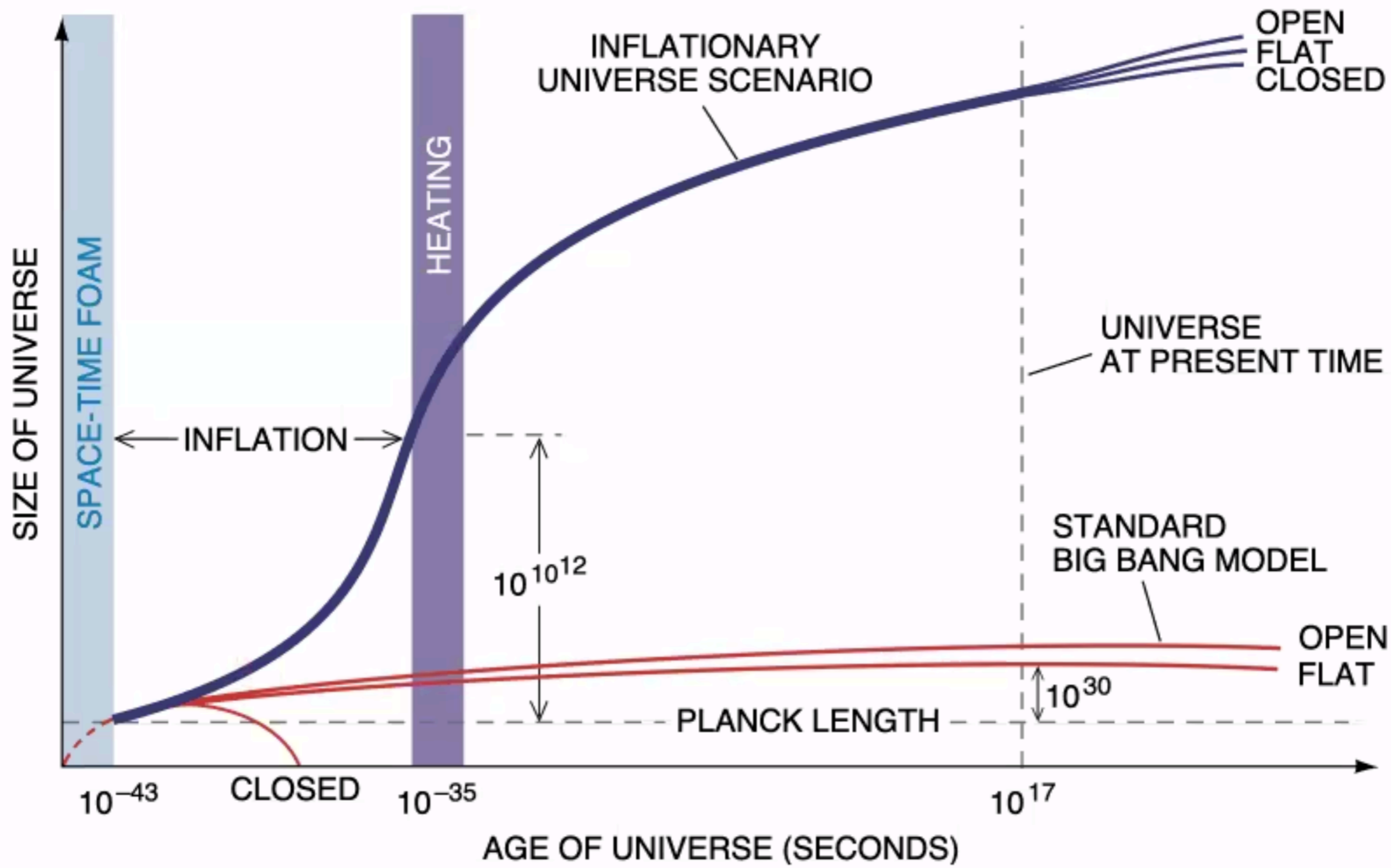
Le satellite Planck



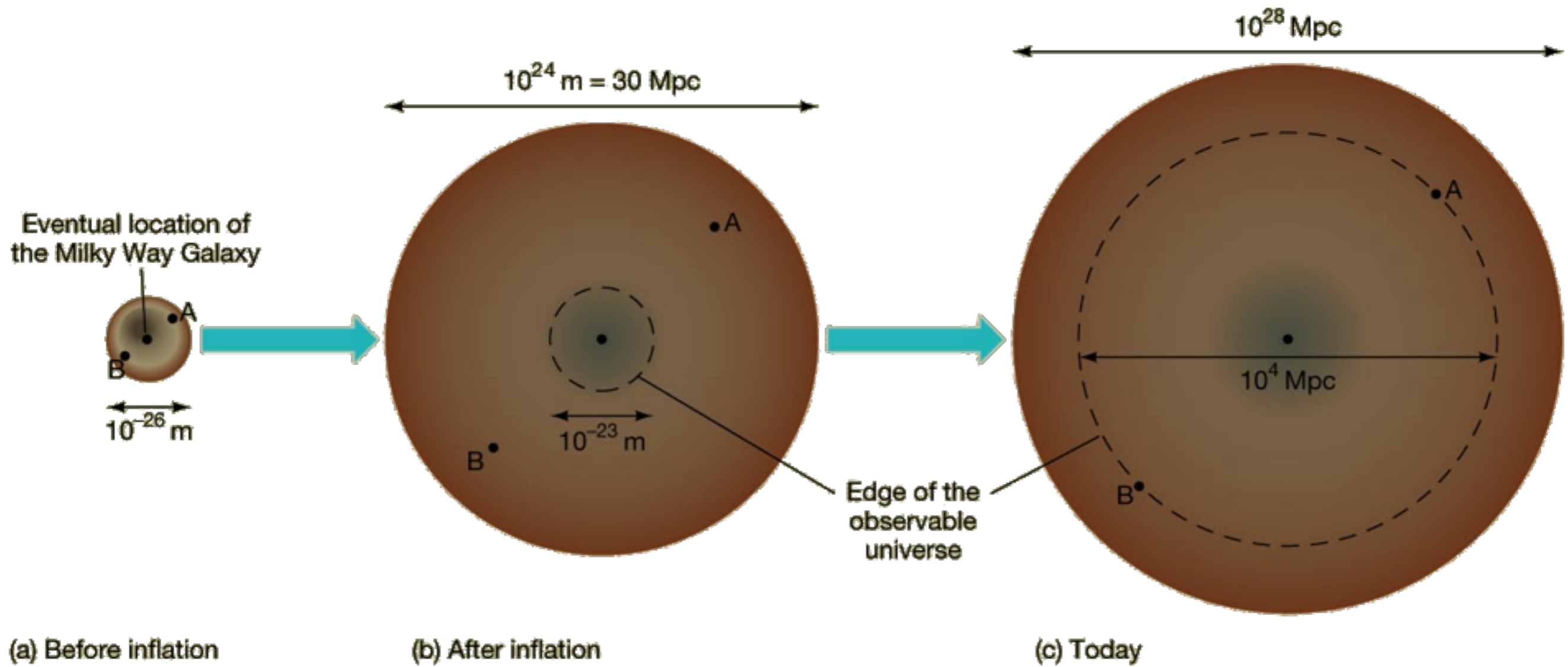


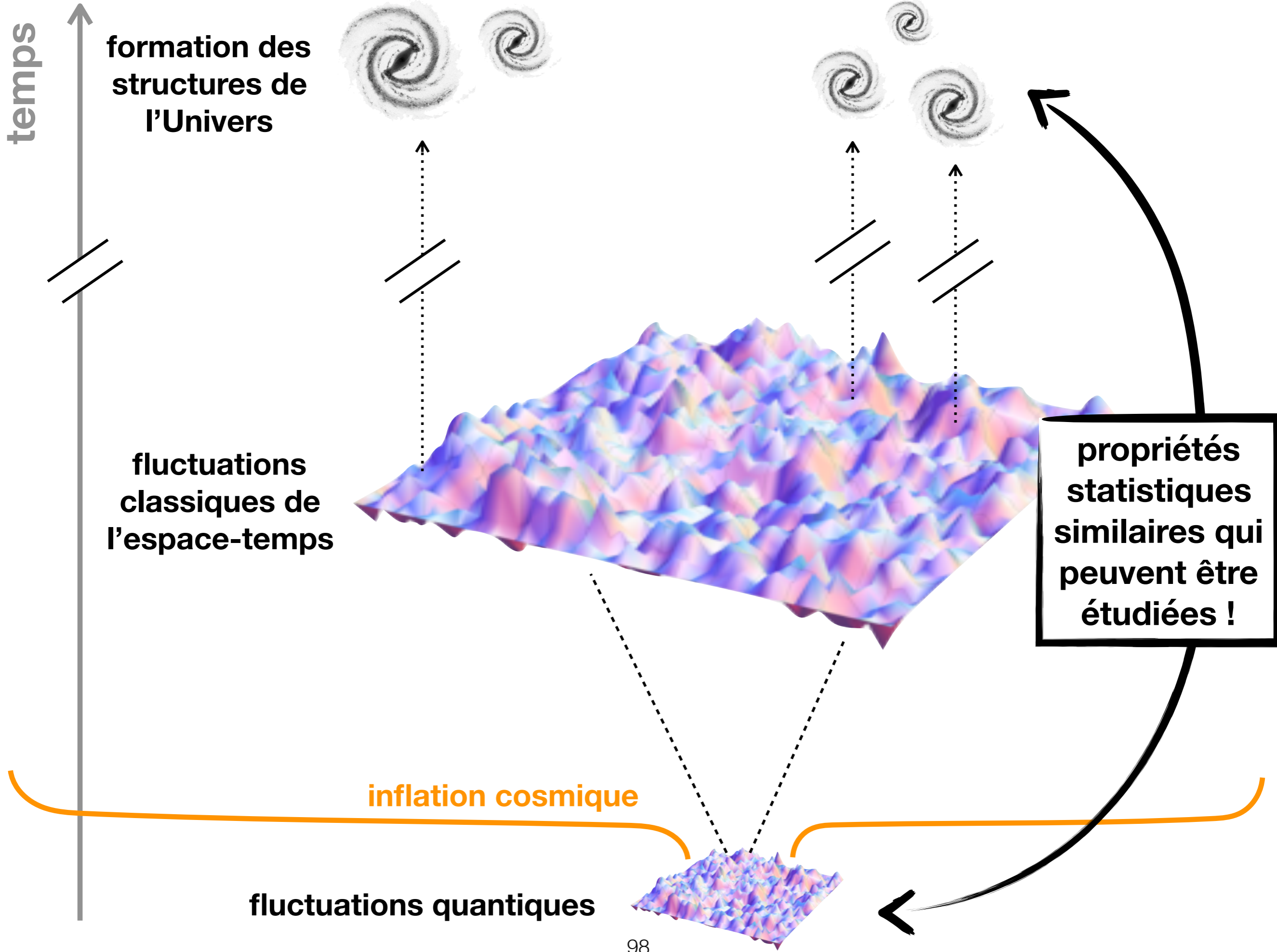
LE FIGARO · fr



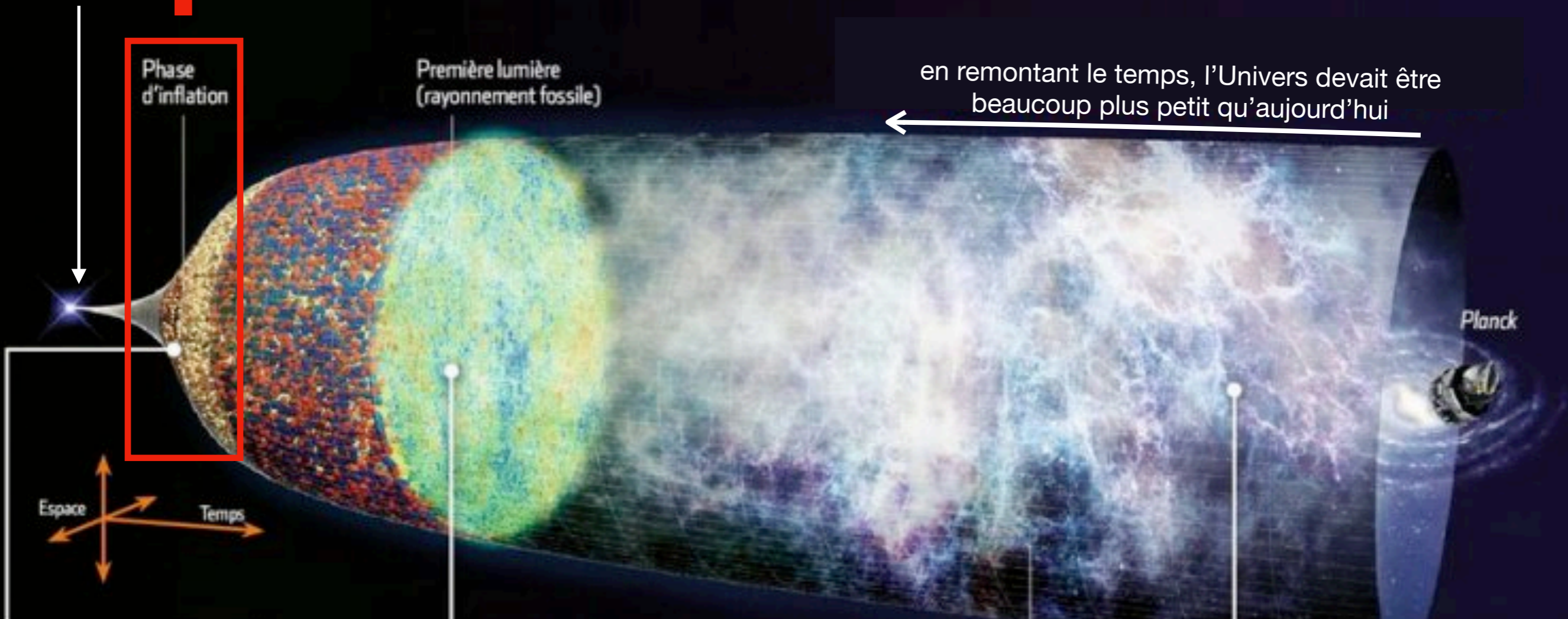


L'inflation cosmique





Big Bang ?



1 - L'INFLATION BRUTALE SE CONFIRME

Entre 10^{-38} et 10^{-30} seconde après le big bang, l'Univers aurait connu une phase d'expansion exponentielle, appelée inflation. Pour la première fois, le satellite *Planck* en dévoile la dynamique et confirme qu'elle s'est terminée par un ralentissement progressif.

2 - TROIS ANOMALIES ENTACHENT LE FOND LUMINEUX DE L'UNIVERS

380 000 ans après le big bang, les protons et les neutrons s'assemblent pour former des noyaux, libérant des flots de photons. L'Univers émet sa première lumière. En épluchant les fluctuations de ce fond lumineux, *Planck* a dévoilé trois anomalies qui semblent contredire le modèle cosmologique.

Formation des galaxies

3 - LA RECETTE DE L'UNIVERS A UN NOUVEAU DOSAGE

Planck vient de recalculer tous les paramètres cosmologiques : l'Univers s'avère âgé de 13,82 milliards d'années ; il est composé de 4,9% de poussières et de galaxies, de 26,8% de matière noire et de 68,3% d'énergie noire ; et il s'étend à la vitesse de 67 kilomètres par seconde.







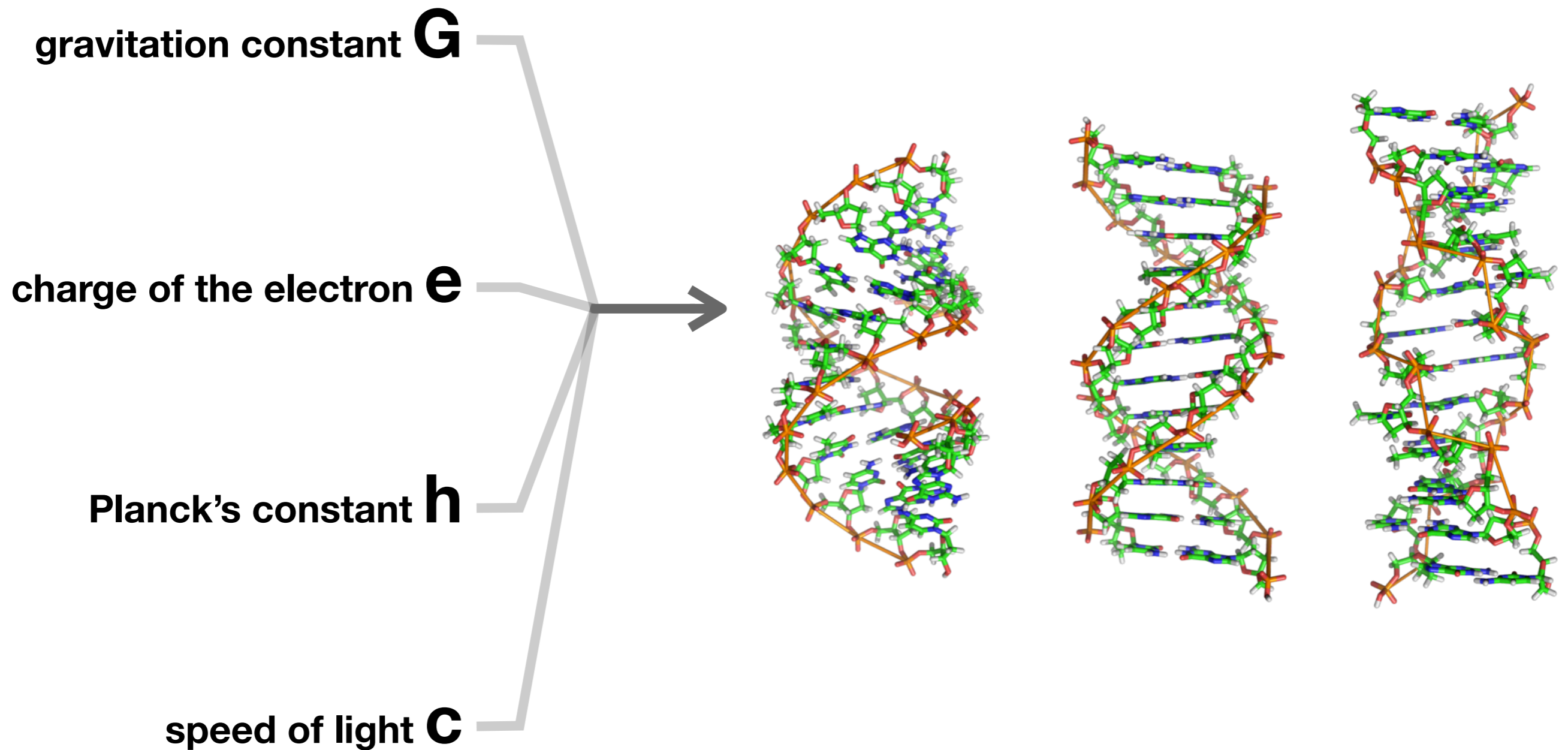




Un monde de multivers ?

l'autre facette intéressante de l'inflation

principe anthropique



gravitation constant **G**

la constante de gravitation détermine l'intensité de la force de gravitation

- si trop faible → la fusion thermonucléaire ne commence pas → les étoiles ne brillent pas.
- si trop grande → les étoiles brûlent trop vite et la vie n'a pas le temps d'émerger.

charge of the electron **e**

la force forte maintient les particules ensemble dans les noyaux des atomes

- si trop faible → l'hydrogène serait le seul élément dans l'Univers
- si trop grande → tous les éléments plus légers que le fer seraient rares

Planck's constant **h**

la constante de couplage électromagnétique détermine l'intensité de la force électromagnétique

- si trop faible → les électrons ne sont pas retenus en orbite autour des noyaux
- si trop grande → les électrons ne créent pas de liens avec d'autres atomes
- dans les deux cas, les molécules ne se créent pas

speed of light **C**

Principe anthropique: l'Univers doit avoir, à un certain stade de son histoire, les propriétés permettant à la vie de se développer en son sein.

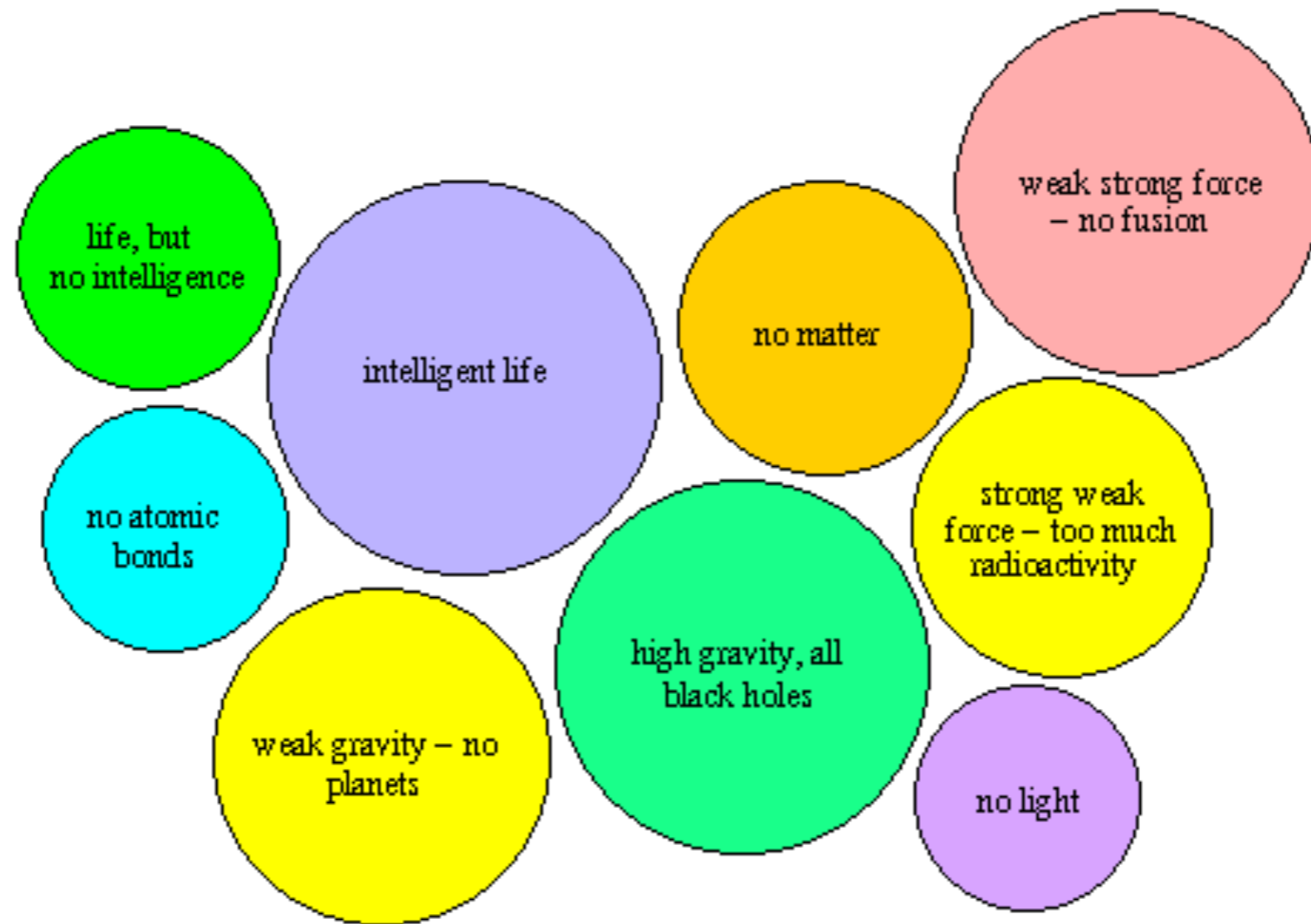
Il existe quatre alternatives possibles du principe anthropique :

- **La vie est robuste et surviendrait indépendamment de ce que sont les constantes physiques.**
- **Il n'y a qu'un seul Univers et les constantes physiques sont sélectionnées au hasard, nous avons eu de la chance que cet univers ait les bonnes valeurs.**
- **Il existe différentes régions de l'Univers où les constantes physiques prennent des valeurs différentes, nous vivons dans l'une de ces régions.**
- **Les constantes physiques ne sont pas aléatoires, l'Univers a été conçu pour être tel qu'il est par une divinité.**

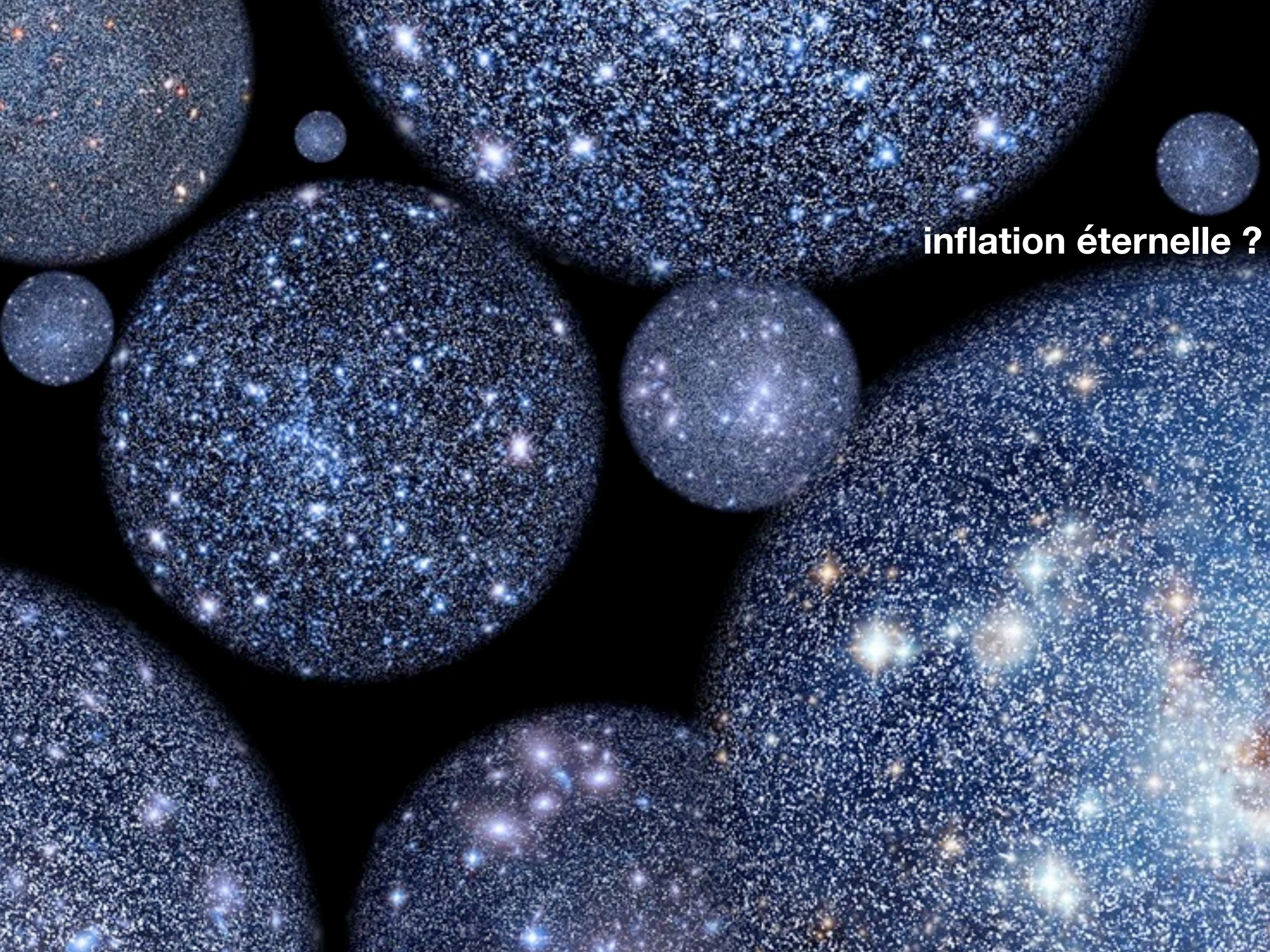


Anthropic Bubbles

one possible solution to the anthropic dilemma is the numerous bubble universes produced by inflation. Each bubble universe may have its own physical constants, which determine the evolution within the bubble



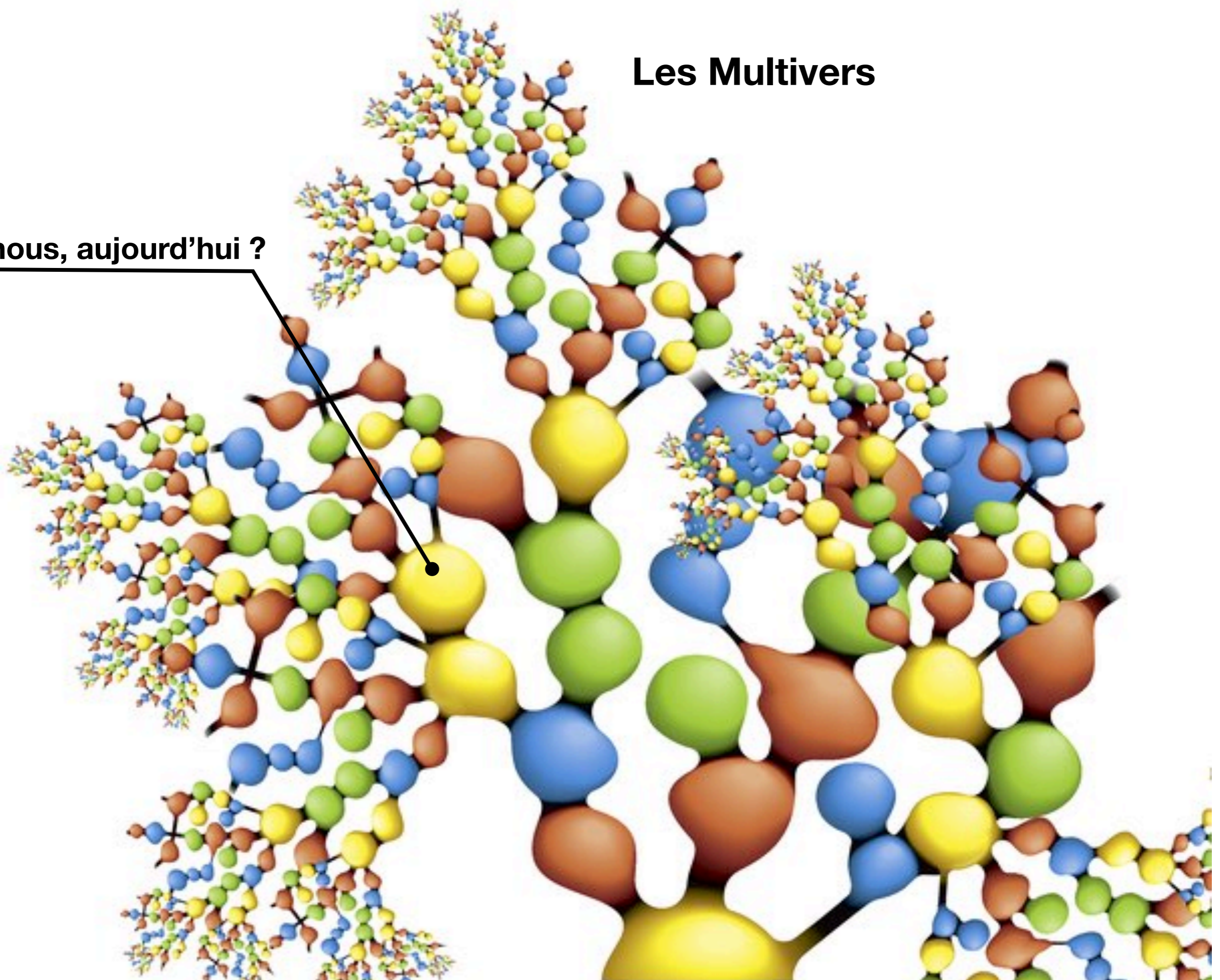
the evolution of intelligent life is extremely sensitive to the initial conditions, but since number of bubble universes is also large, the possibility is finite and our existence is not a big mystery



inflation éternelle ?

Les Multivers

nous, aujourd'hui ?



A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and nodes. The filaments are interconnected, forming a web-like structure. Numerous bright orange and yellow points are scattered throughout, representing galaxies and galaxy clusters. The background is dark, making the blue filaments and orange points stand out.

Conclusions

astronomie multi-messagers

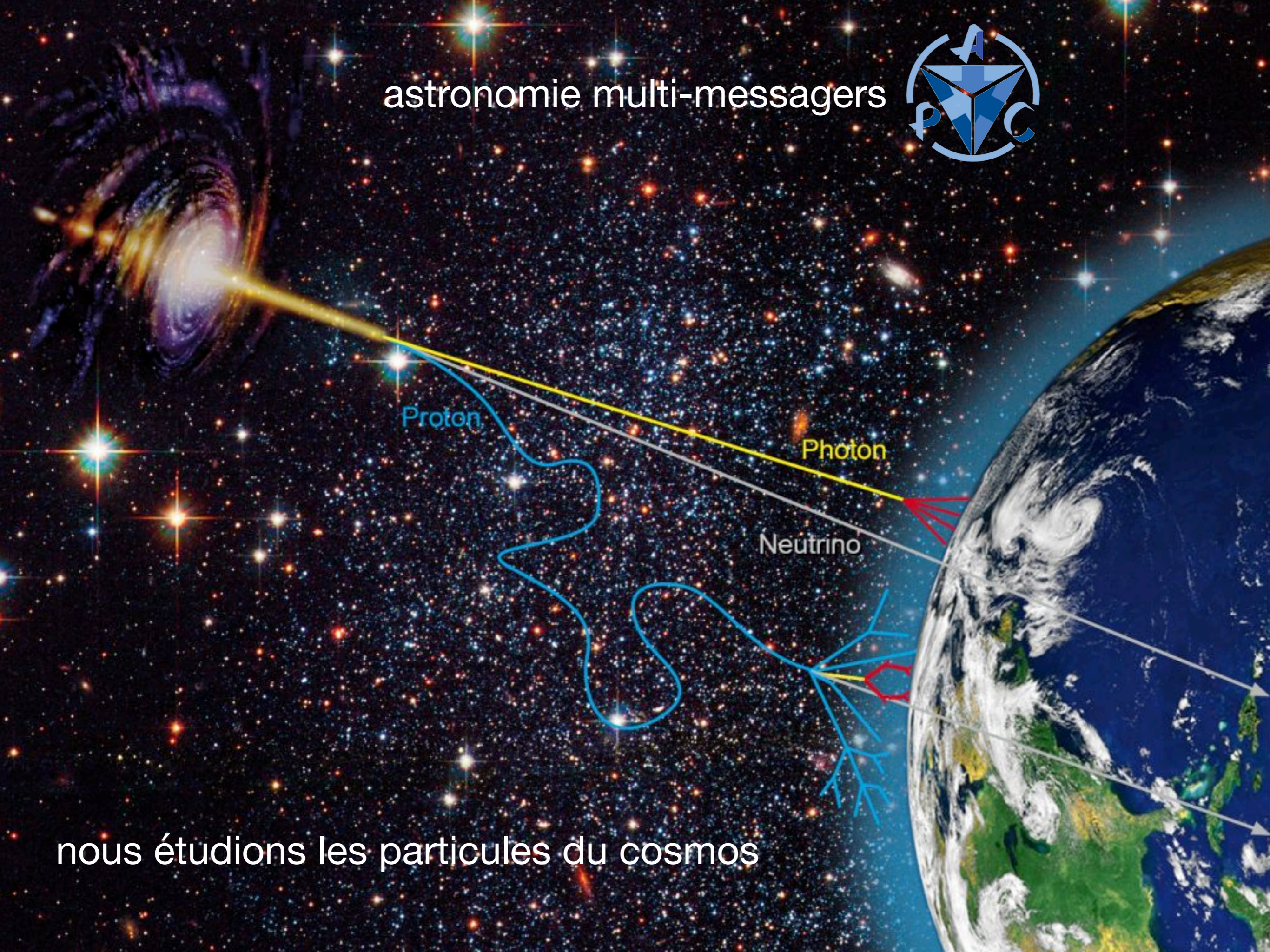


Proton

Photon

Neutrino

nous étudions les particules du cosmos





nous étudions les particules du cosmos



nous étudions les ondes gravitationnelles du cosmos



nous étudions les photons du cosmos

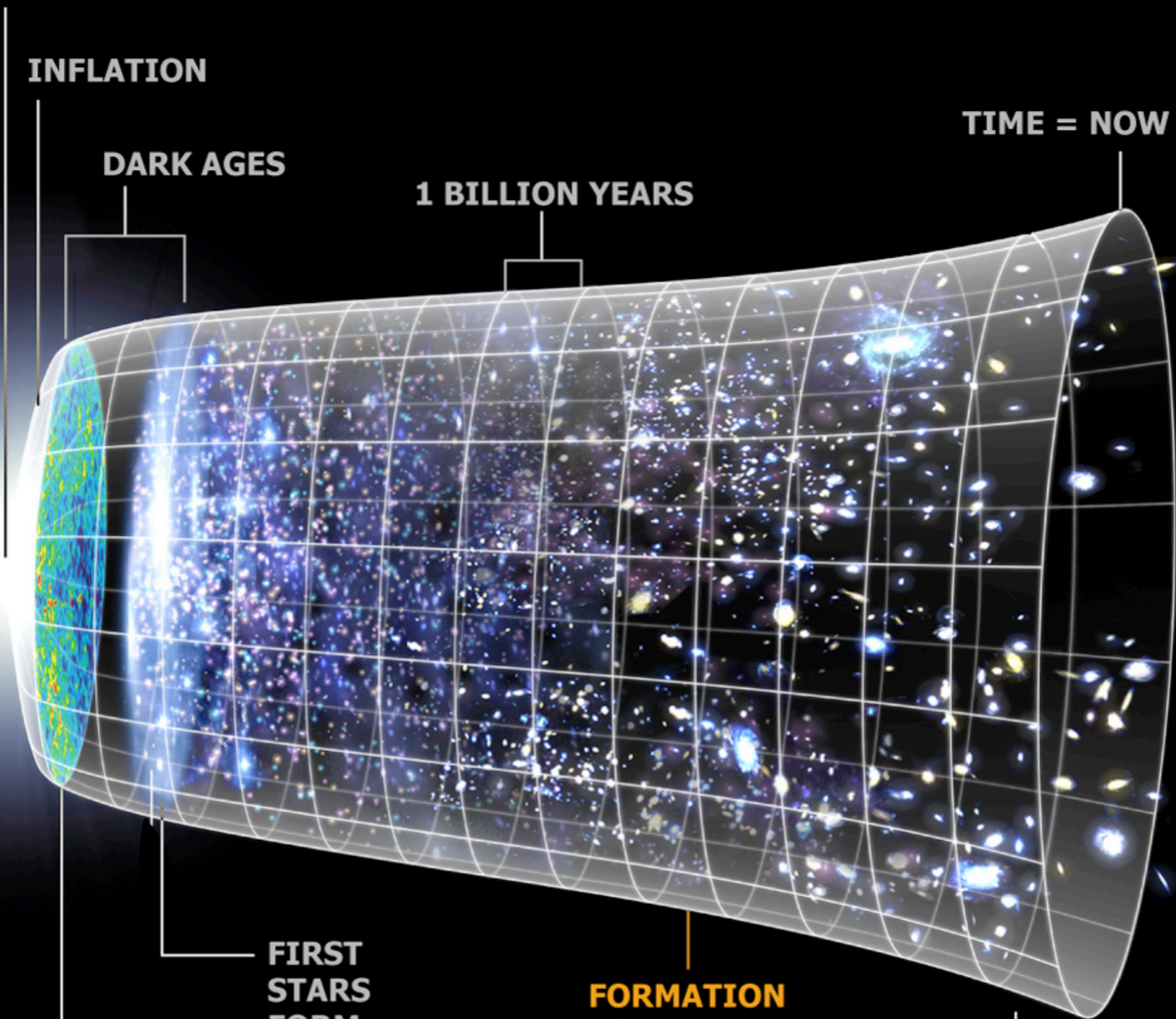
TIME = ZERO: BIG BANG

INFLATION

DARK AGES

1 BILLION YEARS

TIME = NOW



FIRST STARS FORM

FORMATION OF EARTH

QUARK SOUP, EMISSION OF COSMIC RADIATION

ACCELERATING EXPANSION

13.7 BILLION YEARS

afin de
comprendre le
passé et l'avenir
de notre Univers