

Teaching the Universe / Enseigner la cosmologie

# La nuit n'est (peut-être) pas noire



European Research Council  
Established by the European Community



Josquin Errard (APC / CNRS)

[josquin@apc.in2p3.fr](mailto:josquin@apc.in2p3.fr)

18 janvier 2024





Teaching the Universe / Enseigner la cosmologie

# La nuit n'est (peut-être) pas noire



European Research Council  
Established by the European Commission



## SciPo

Science from the large scale  
cosmic microwave background  
polarization structure





“ 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.”





“ 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 ?

la cosmologie est une science abstraite

POLARBEAR telescope,  
désert d'Atacama, Chili  
5200m d'altitude

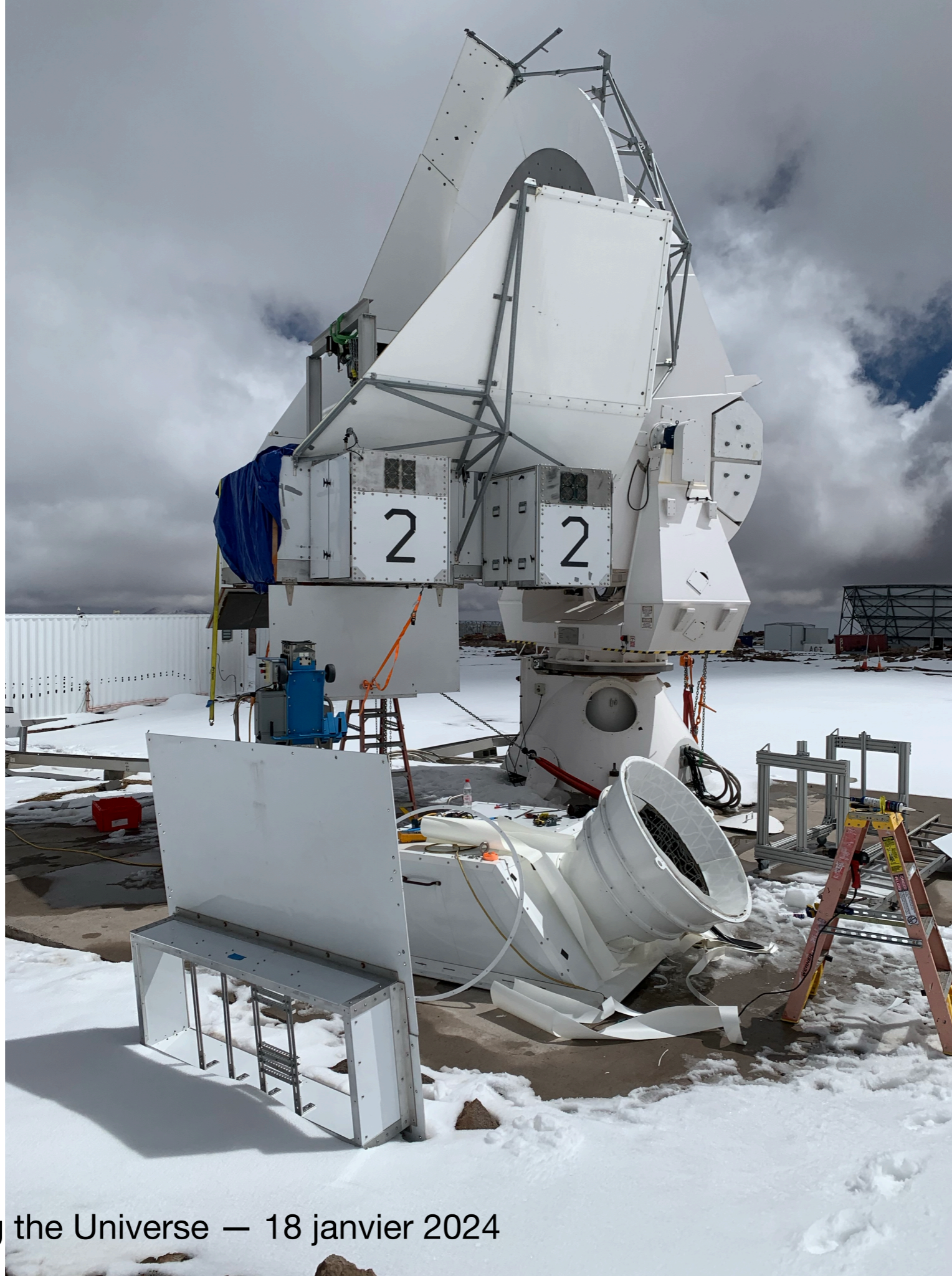














# **Introduction : Univers local, galaxies et nuit noire**



Quelques observations de notre environnement (spatial)

écliptique

Jupiter

Mars

Venus

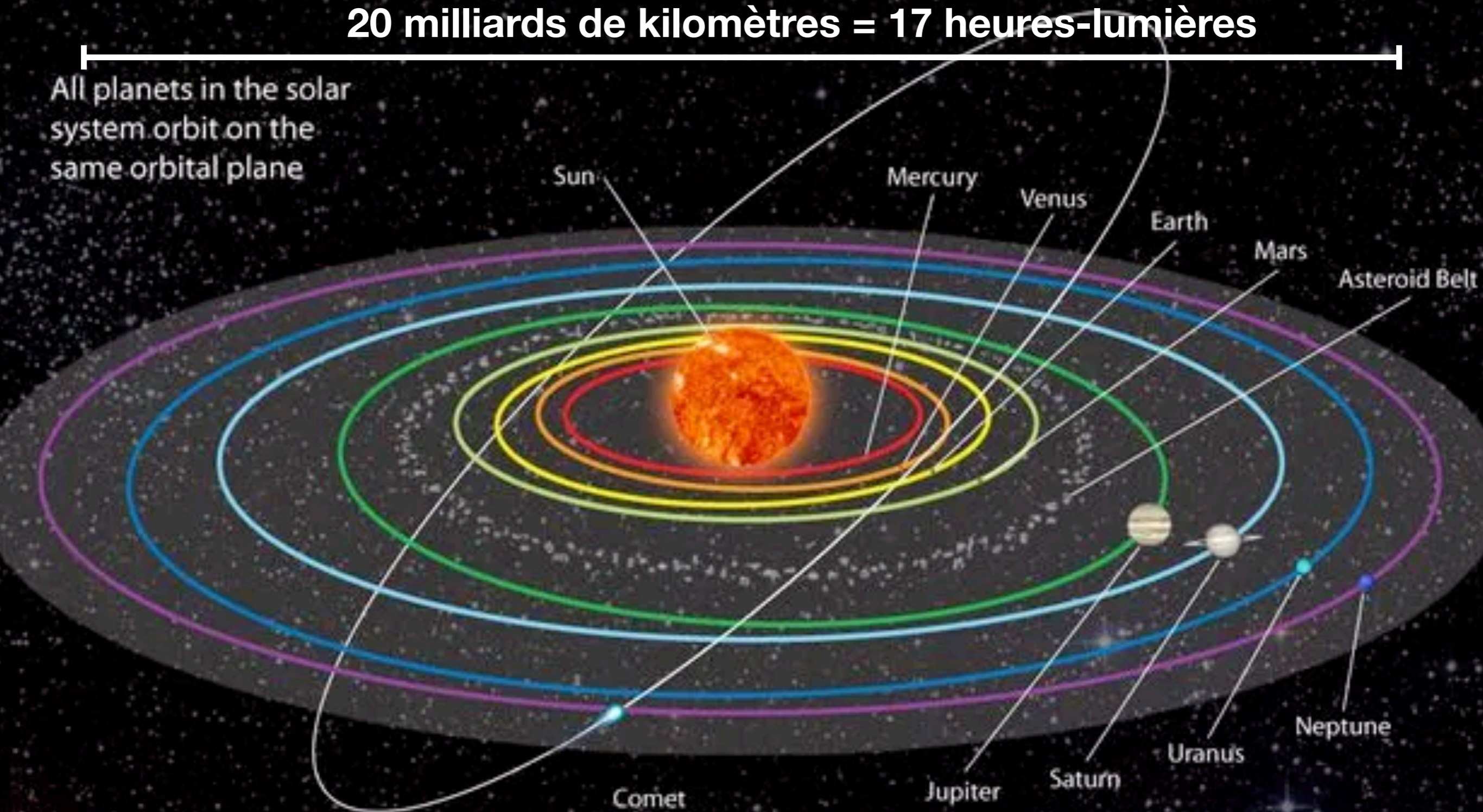


Quelques observations de notre environnement (spatial)

# Orbital Plane

20 milliards de kilomètres = 17 heures-lumières

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



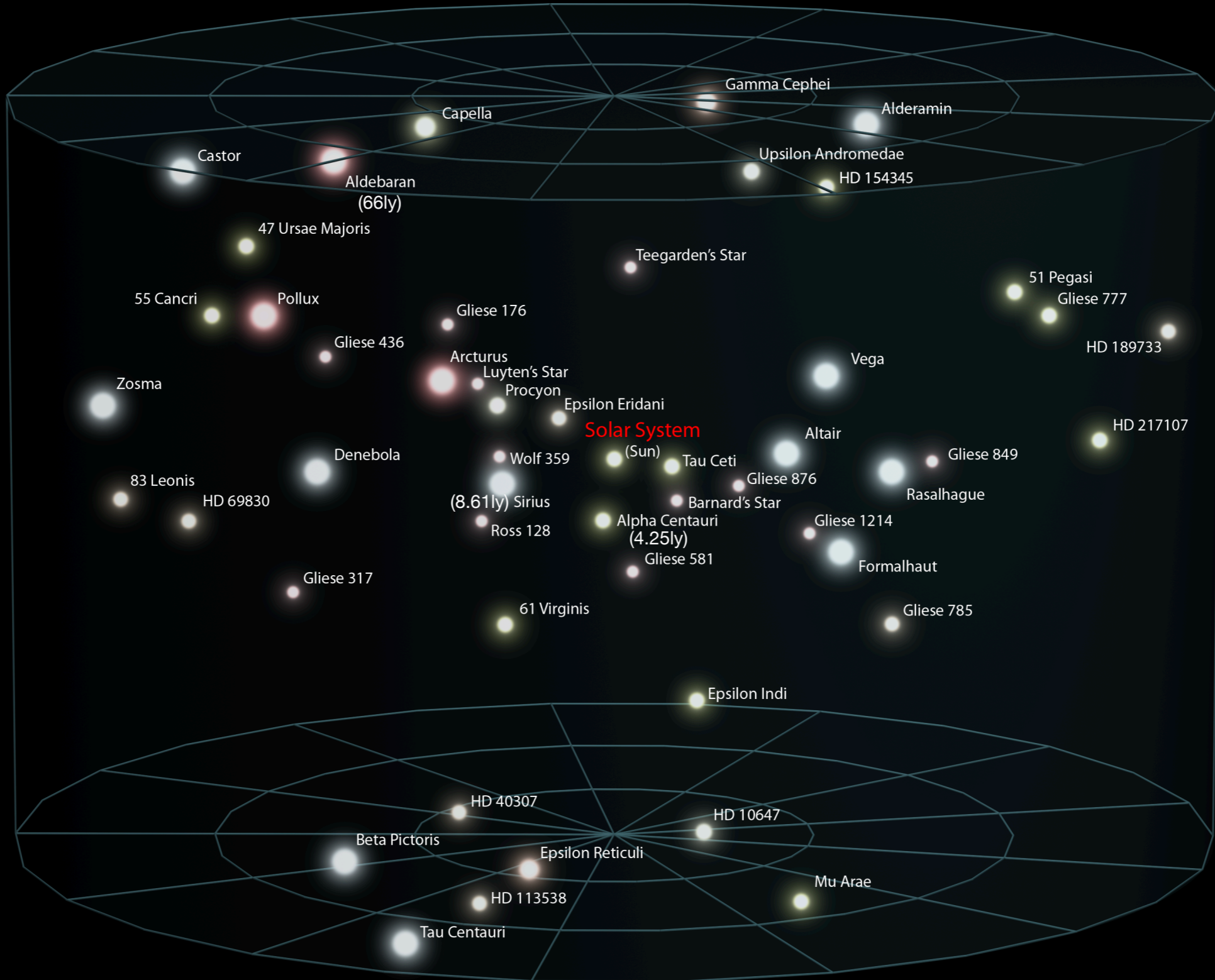
\* Many comets exist outside the orbital plane



# Quelques observations de notre environnement (spatial)



# Quelques observations de notre environnement (spatial)





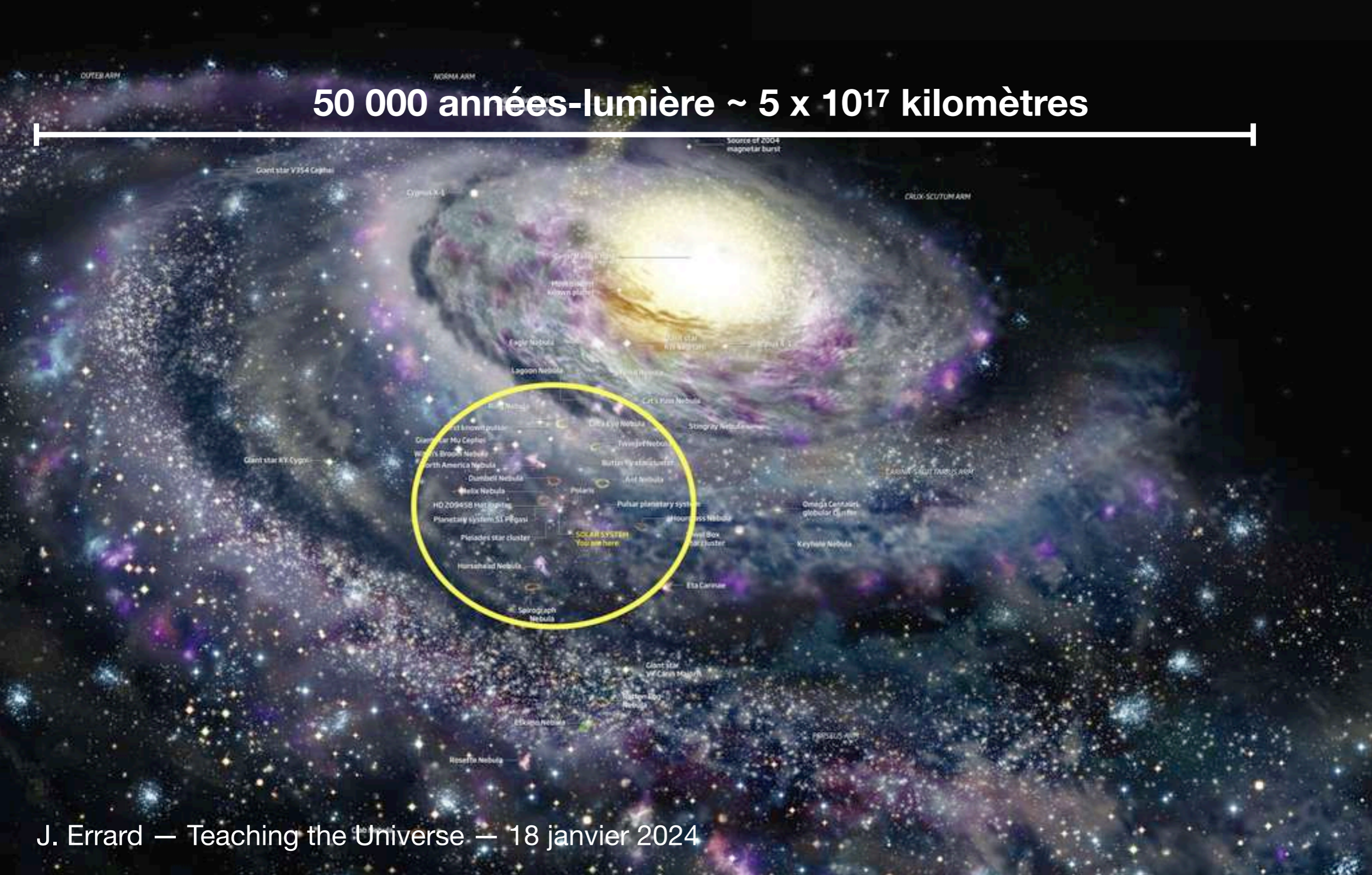
Quelques observations de notre environnement (spatial)





Quelques observations de notre environnement (spatial)  
**3 à 400 milliards d'étoiles dans la voie lactée ...**

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





Quelques observations de notre environnement (spatial)

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



Quelques observations de notre environnement (spatial)

natu



520 millions d'années-lumière  
(4% du diamètre de l'Univers observable)

**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.



Quelques observations de notre environnement (spatial)

# Cosmic Web/ toile cosmique

~ 700 millions  
d'années-  
lumière





93 billion light years





La cosmologie est l'étude scientifique des propriétés à grande échelle de l'univers dans son ensemble. Elle cherche à comprendre l'origine, l'évolution et le destin éventuel de l'univers.





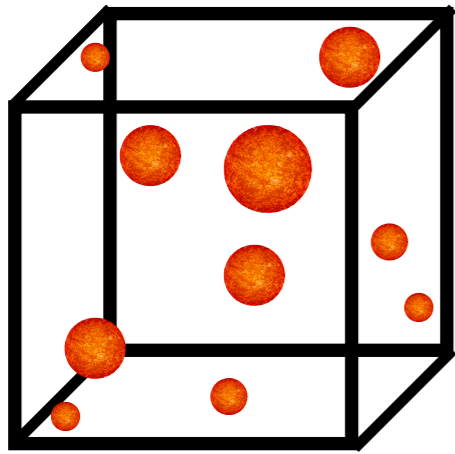




Pourquoi le ciel nocturne est-il noir ?

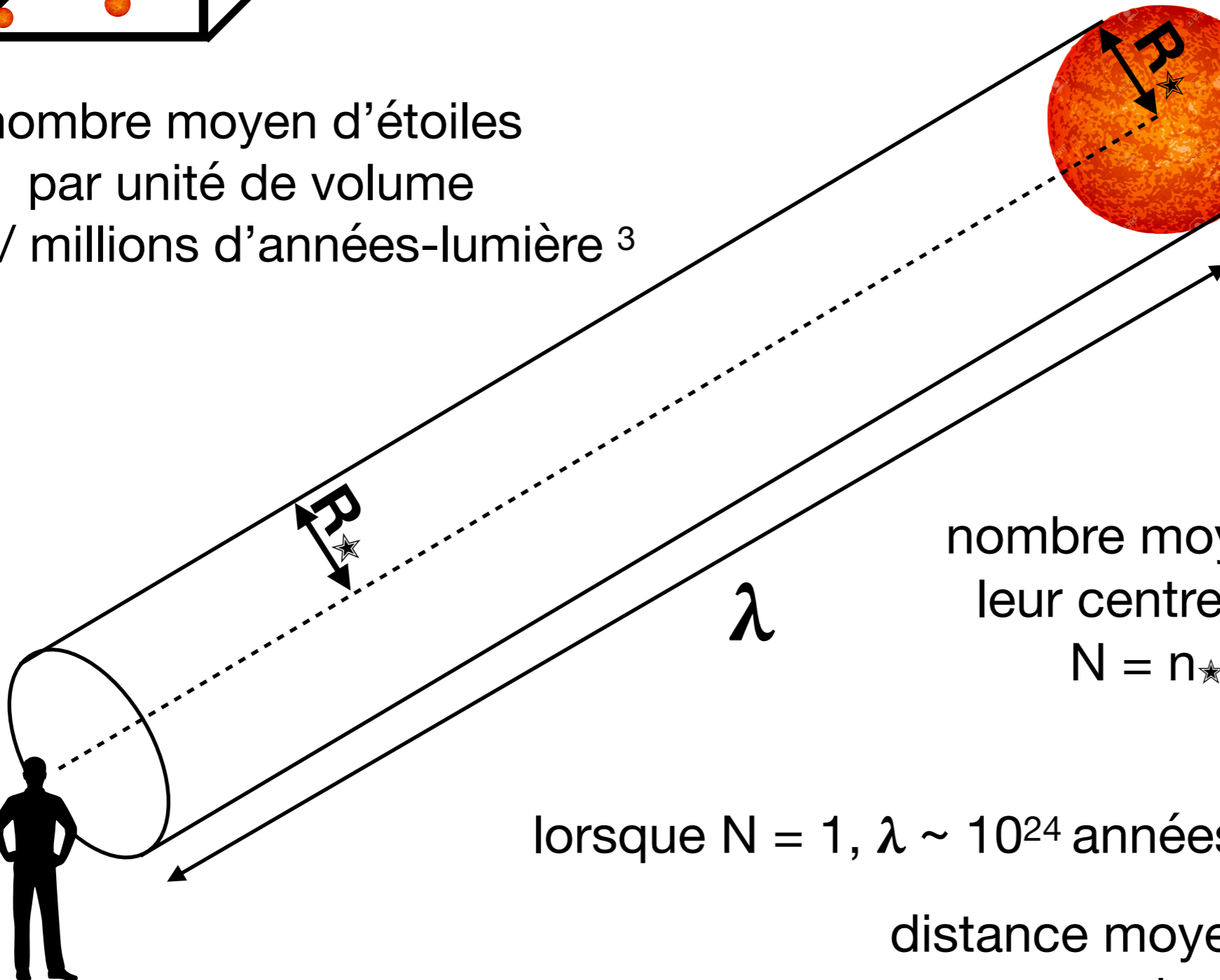
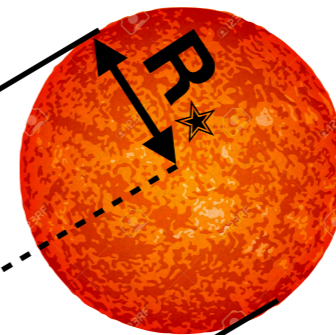
nombre moyen d'étoiles  
par unité de volume  
=  $10^8$  / millions d'années-lumière<sup>3</sup>





nombre moyen d'étoiles  
par unité de volume  
 $= 10^8 / \text{millions d'années-lumière}^3$

$$R_{\star} = 7 \times 10^8 \text{ m}$$
$$= 2.3 \times 10^{-14} \text{ Mpc}$$



nombre moyen d'étoile qui ont  
leur centres dans le cylindre

$$N = n_{\star} V = n_{\star} \lambda \pi R_{\star}^2$$

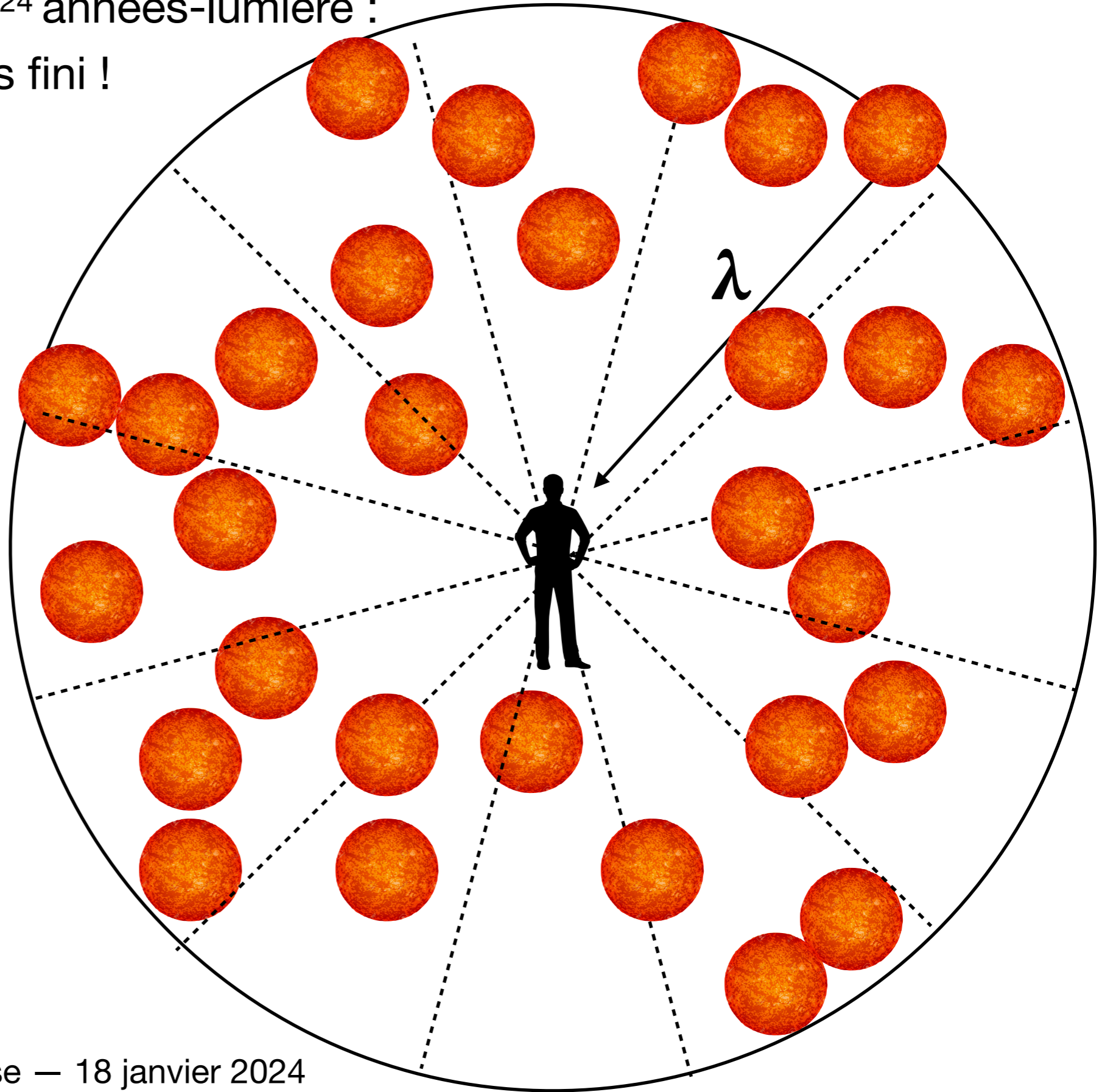
lorsque  $N = 1$ ,  $\lambda \sim 10^{24}$  années-lumière

distance moyenne à laquelle  
notre regard croise une étoile



distance moyenne à laquelle notre regard  
croise une étoile :  $\lambda \sim 10^{24}$  années-lumière :  
ce chiffre est grand, mais fini !

Dans un Univers infini,  
le ciel devrait être rempli  
d'étoiles

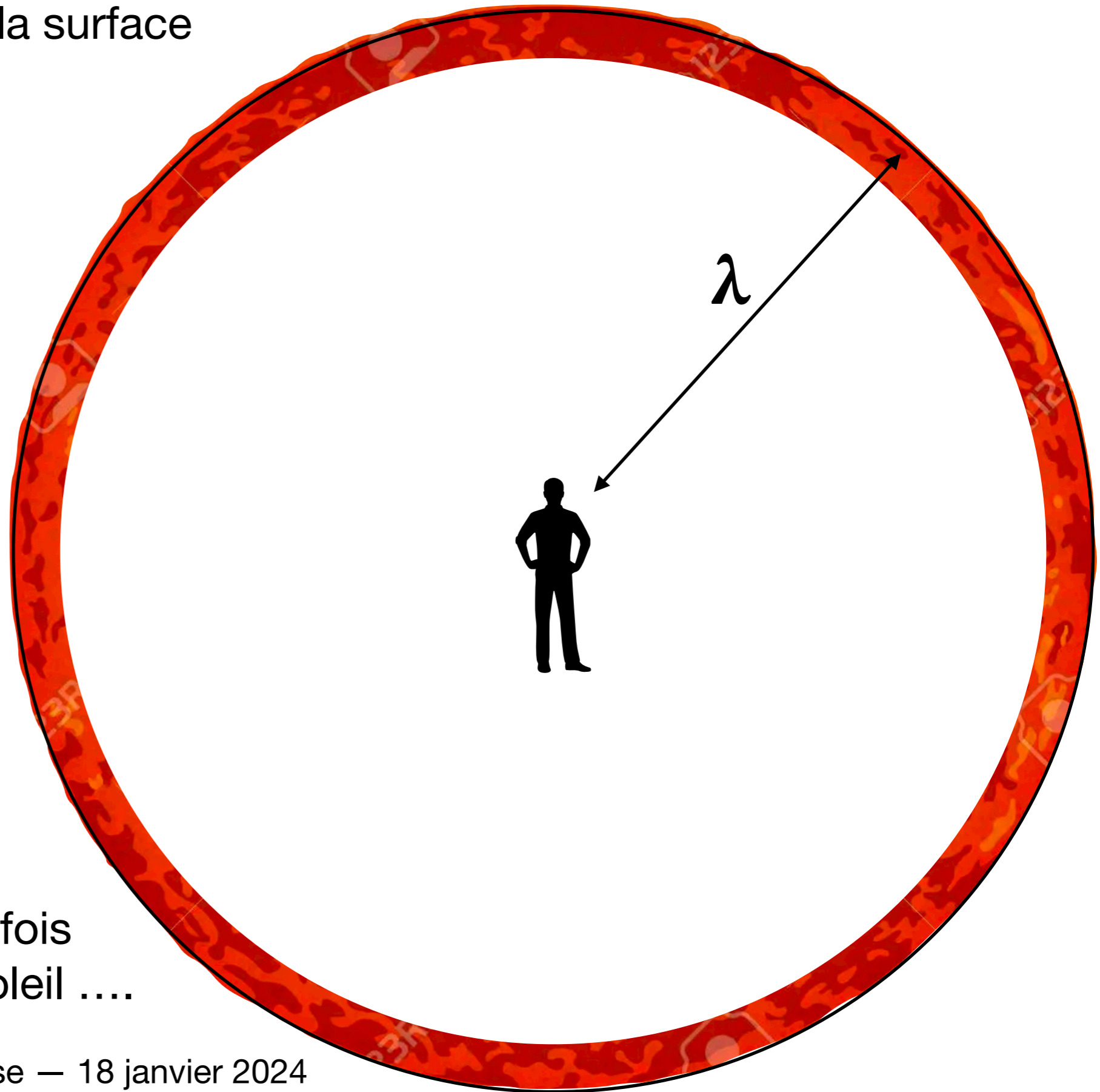








et on peut calculer que le ciel devrait être aussi lumineux que la surface d'une étoile !



Or le ciel nocturne est 100,000,000,000,000 de fois moins lumineux que le soleil ....



# Solutions possibles du paradoxe

l'Univers n'est pas transparent

l'Univers n'est pas infiniment grand

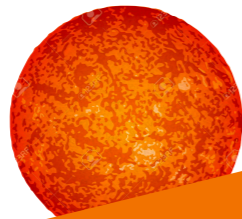
la luminosité des étoiles n'est pas constante

l'Univers n'est pas infiniment âgé



8,3 minutes-  
lumière

Soleil



Proxima

4,2 années

→ av  
éterné

**la bonne réponse :  
l'Univers a un âge (fini),  
environ 13.4 milliards d'années**

[...] dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans toutes les directions est de supposer cet arrière plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. »

[...] dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans toutes les directions est de supposer cet arrière plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. »

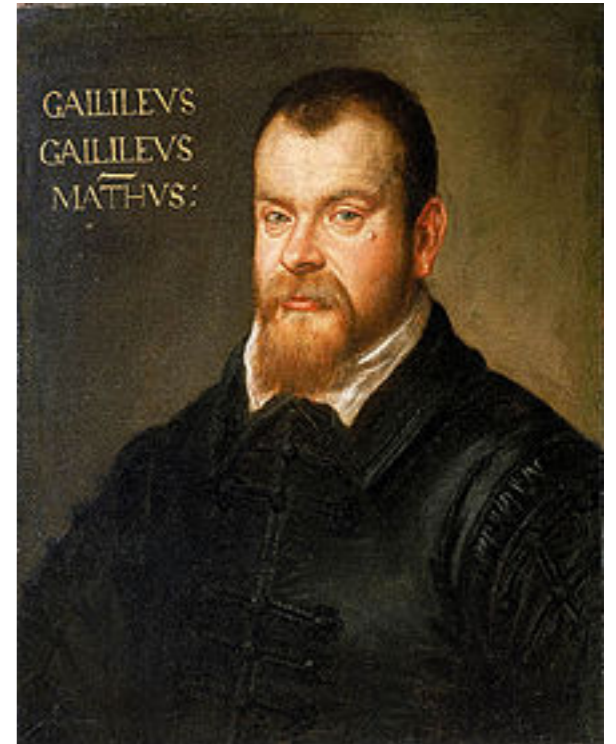


# la relativité Galiléenne, la relativité restreinte et la relativité générale

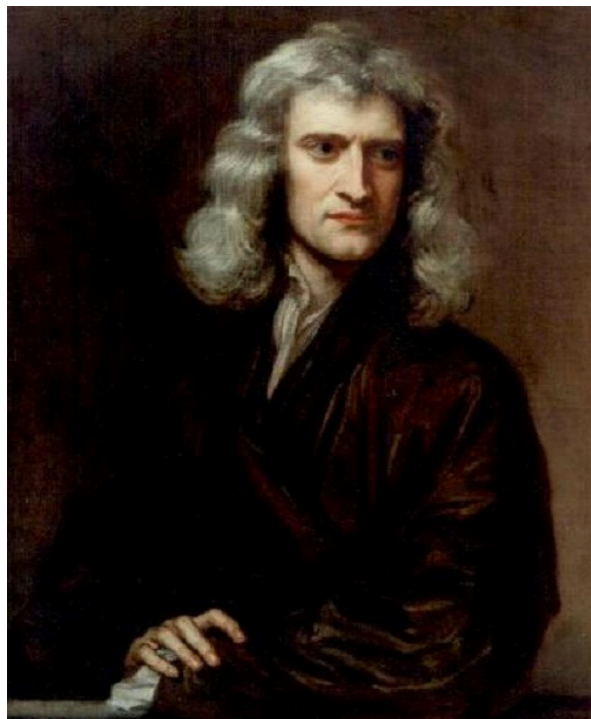


# Relativité galiléenne

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



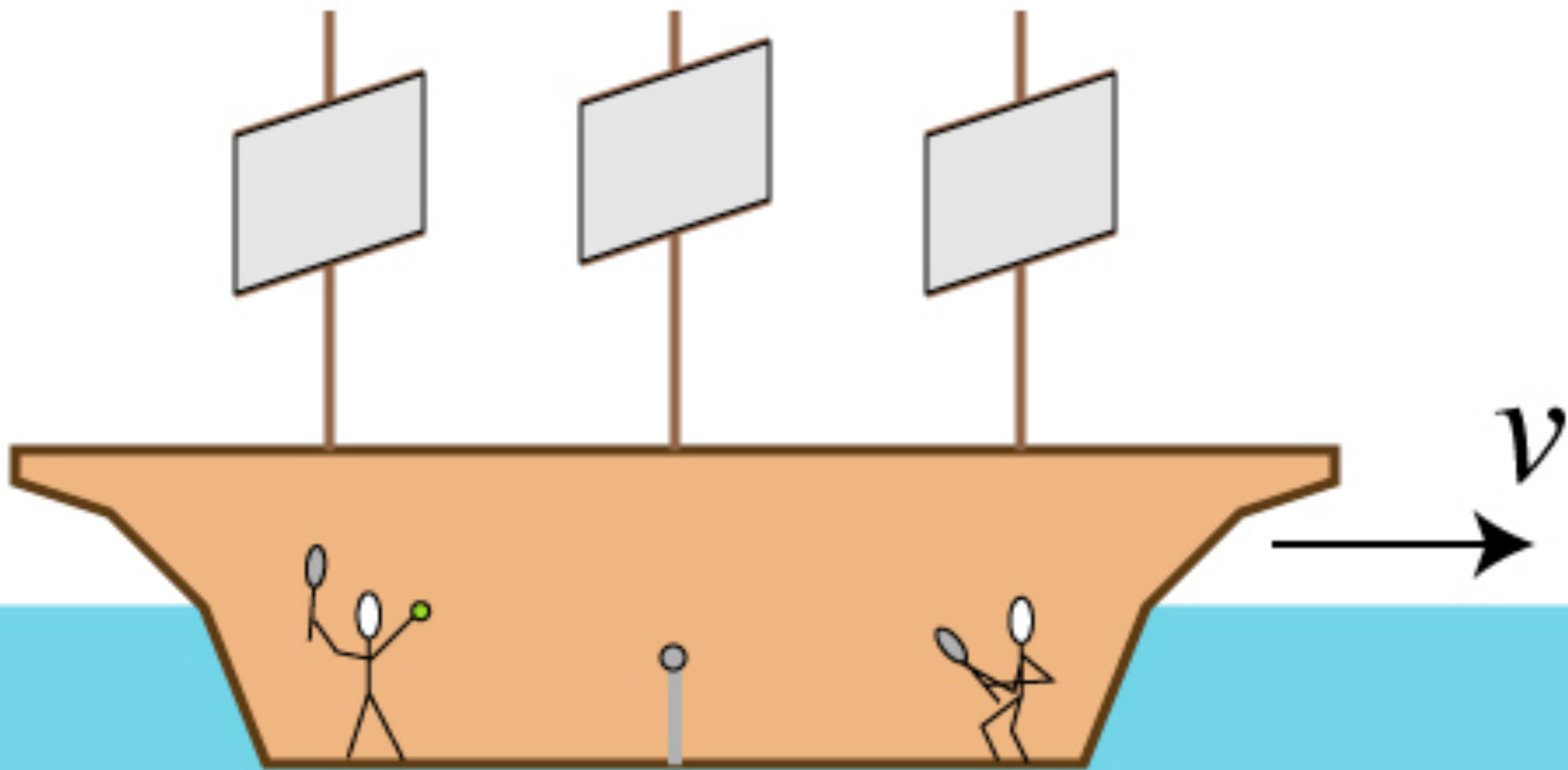
fondement pour les travaux  
Newton, e.g. relation  
fondamentale de la  
dynamique



*coefficient d'inertie*

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









A. Einstein

## Deux postulats de la théorie de la relativité restreinte:

- Toutes les lois de la physique sont invariantes dans tous les référentiels d'inertie.
- La vitesse de la lumière dans le vide,  $c$  a la même valeur dans tous les référentiels d'inertie :  $c$  est une constante universelle.





A. Einstein

## Deux postulats de la théorie de la relativité restreinte:

- Toutes les lois de la physique sont invariantes dans tous les référentiels d'inertie.
- La vitesse de la lumière dans le vide,  $c$  a la même valeur dans tous les référentiels d'inertie :  $c$  est une constante universelle.

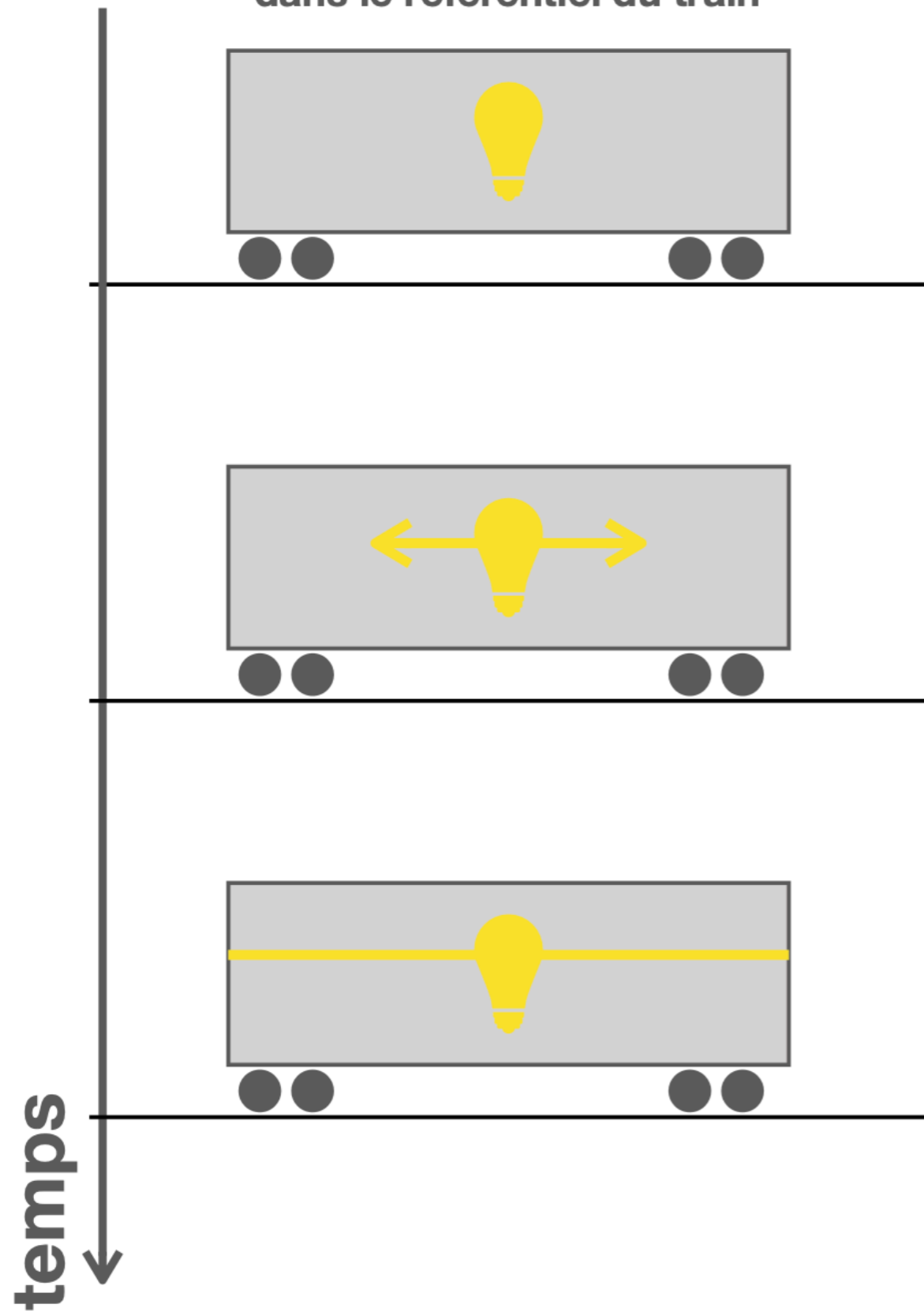
Cet énoncé semble très proche de la relativité galiléenne ...

... pourtant, sous ce postulat :

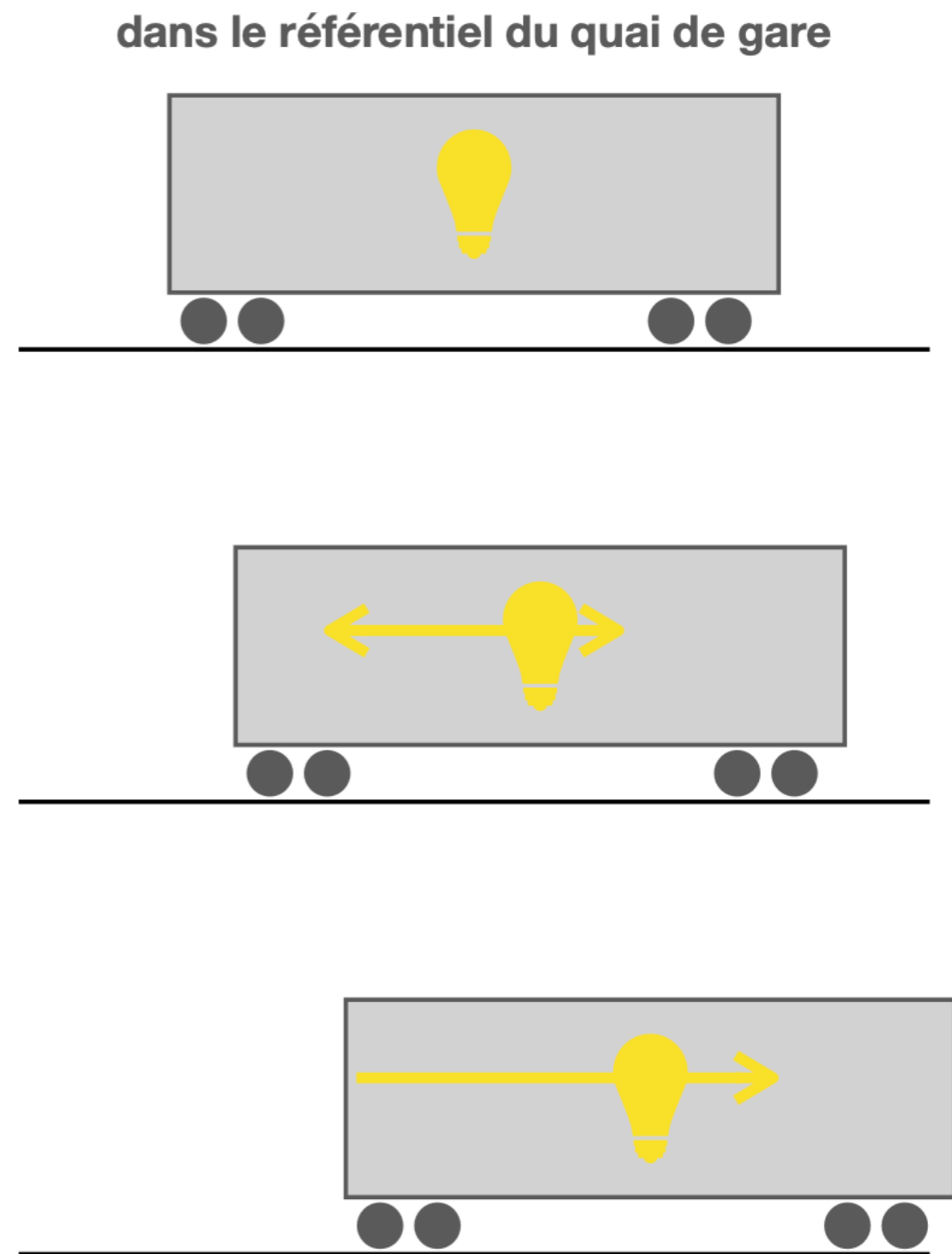
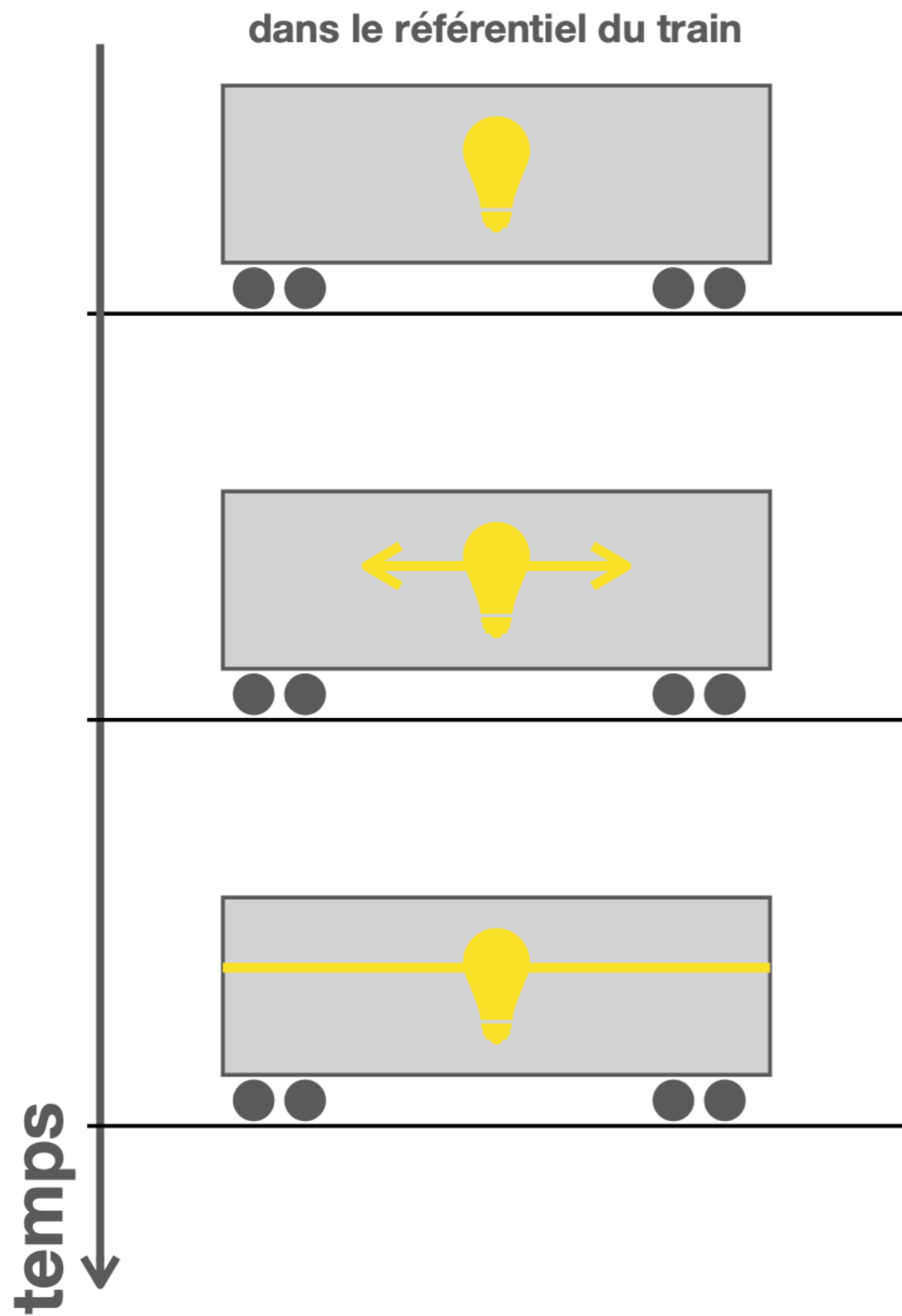
- le temps ne s'écoule pas de la même façon dans deux référentiels galiléens en mouvements relatifs
- deux événements qui se produisent simultanément dans un référentiel peuvent se produire à des instants différents dans un autre référentiel



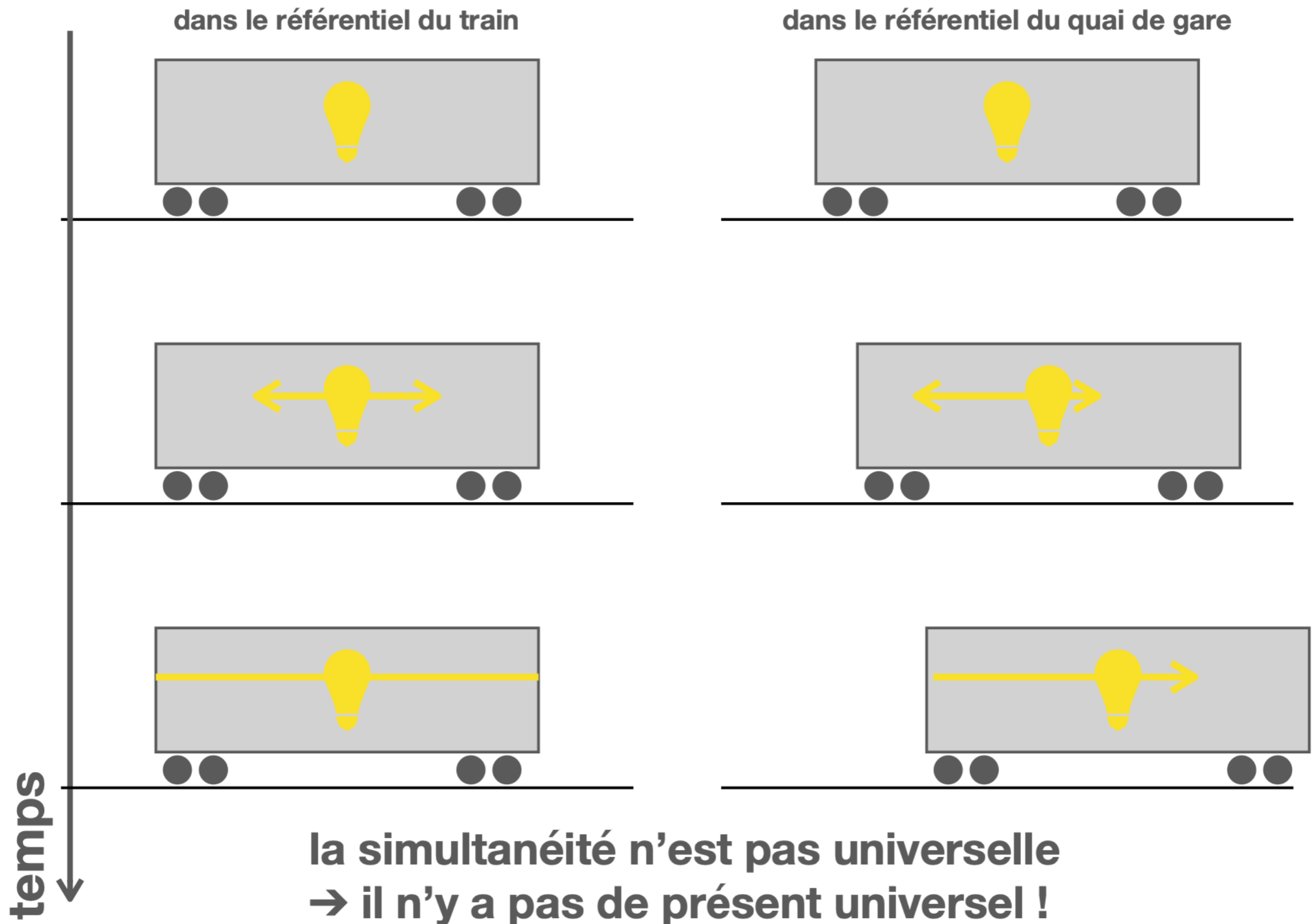
dans le référentiel du train





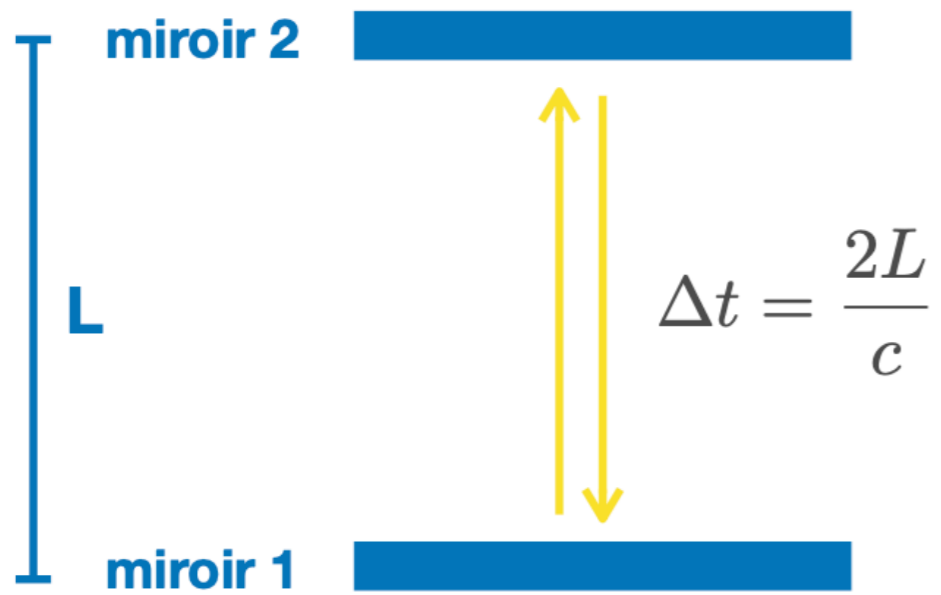






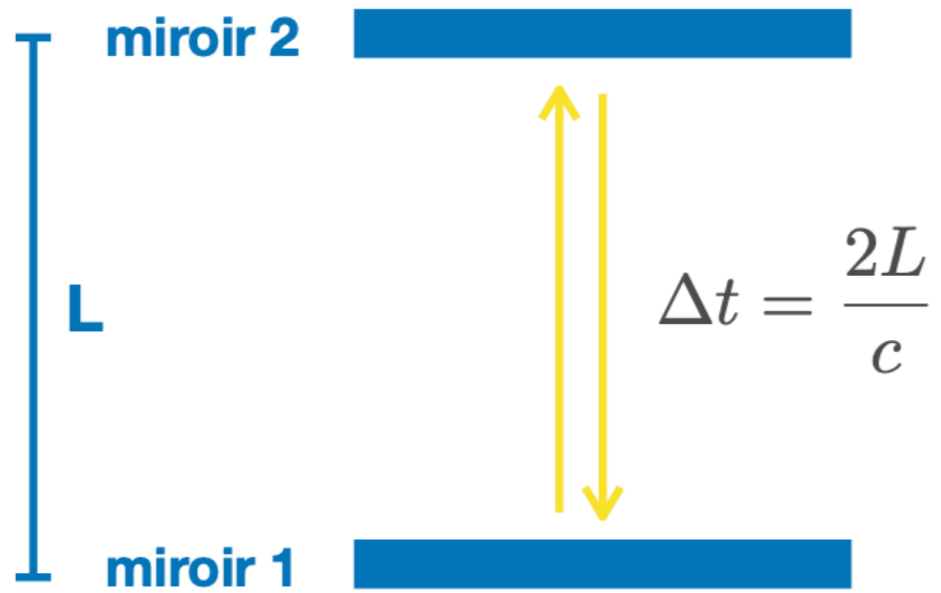


dans le référentiel du train

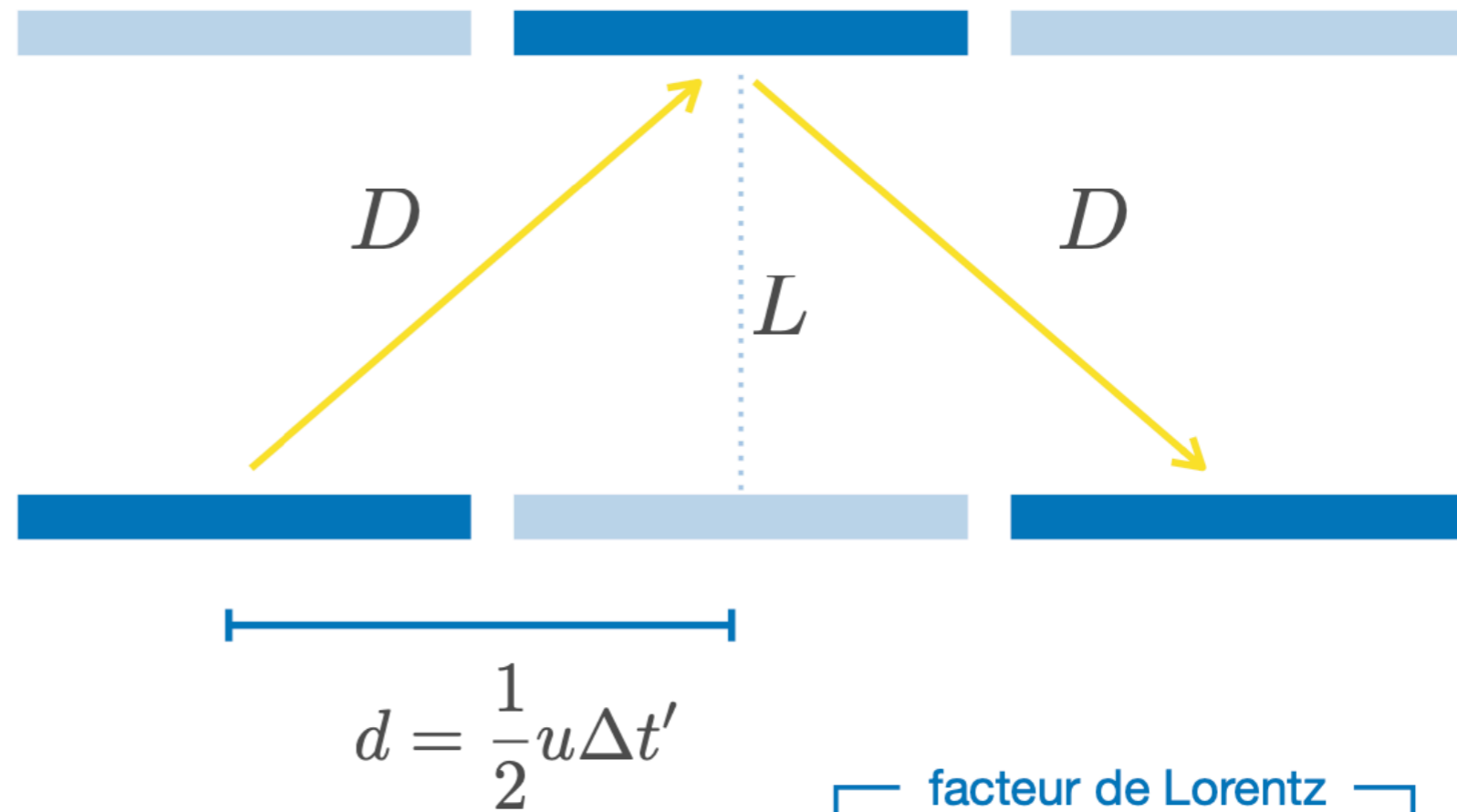




dans le référentiel du train



dans le référentiel du quai de gare



Pythagore + invariance de la vitesse de la lumière :

**dilatation du temps**

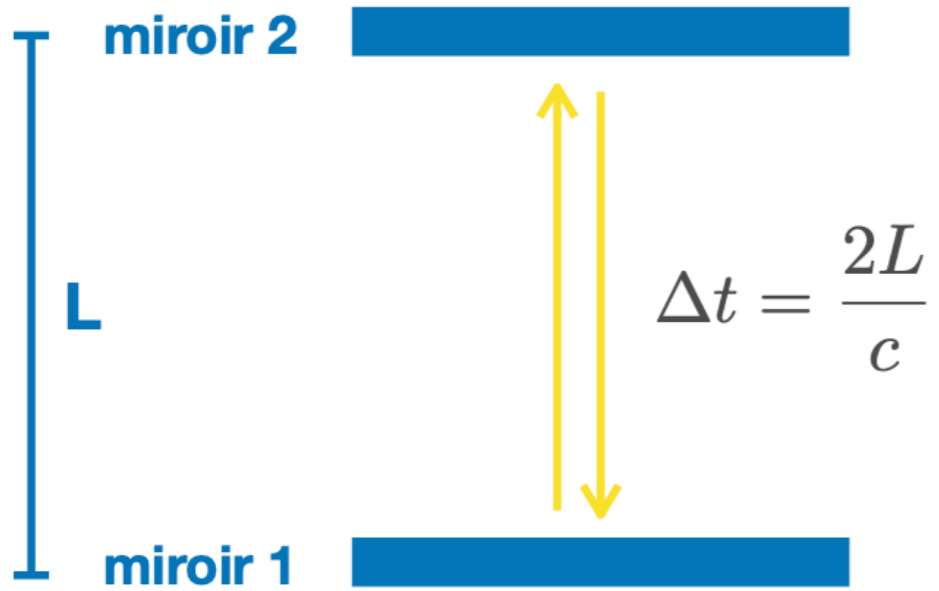
$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

facteur de Lorentz

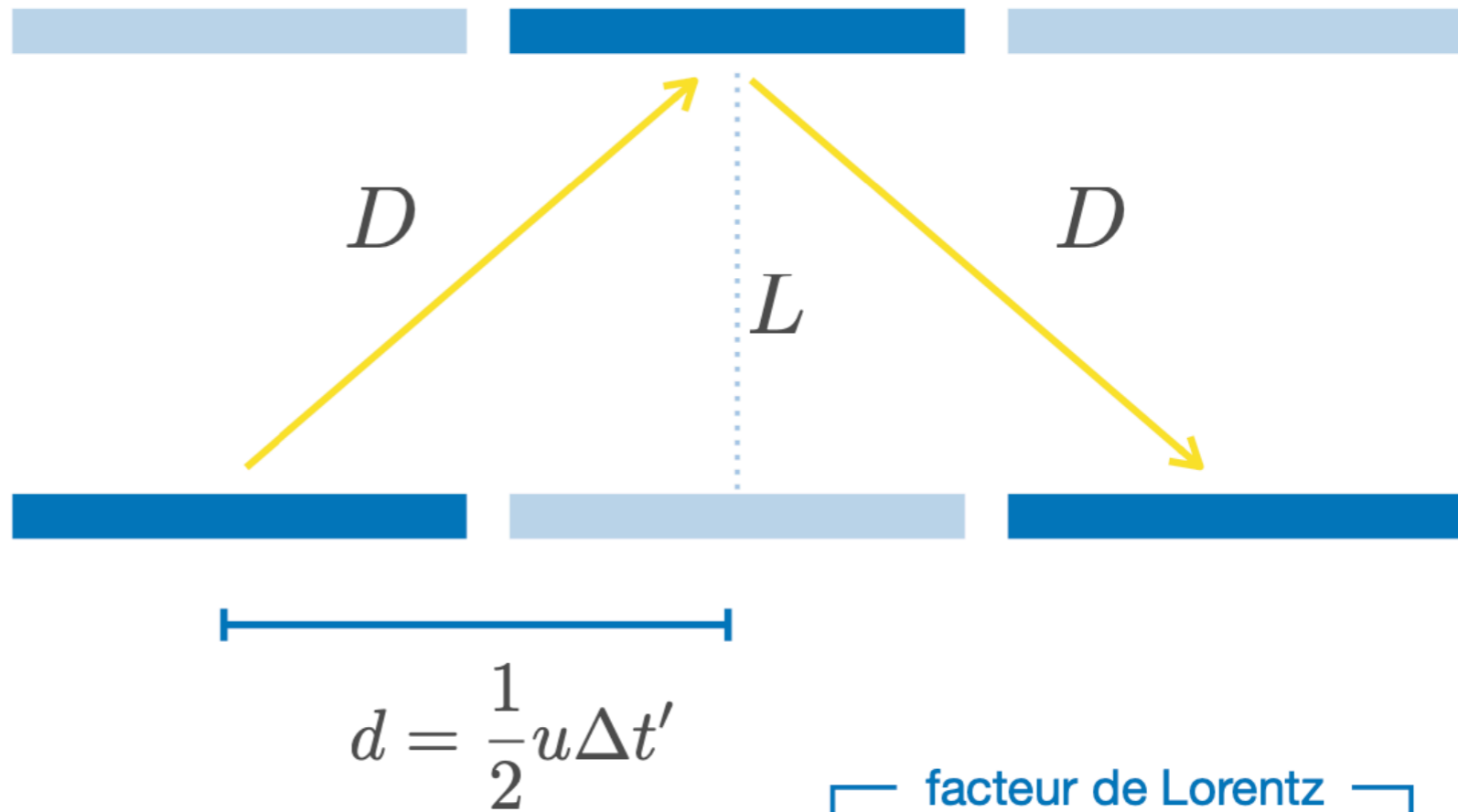
$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$



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

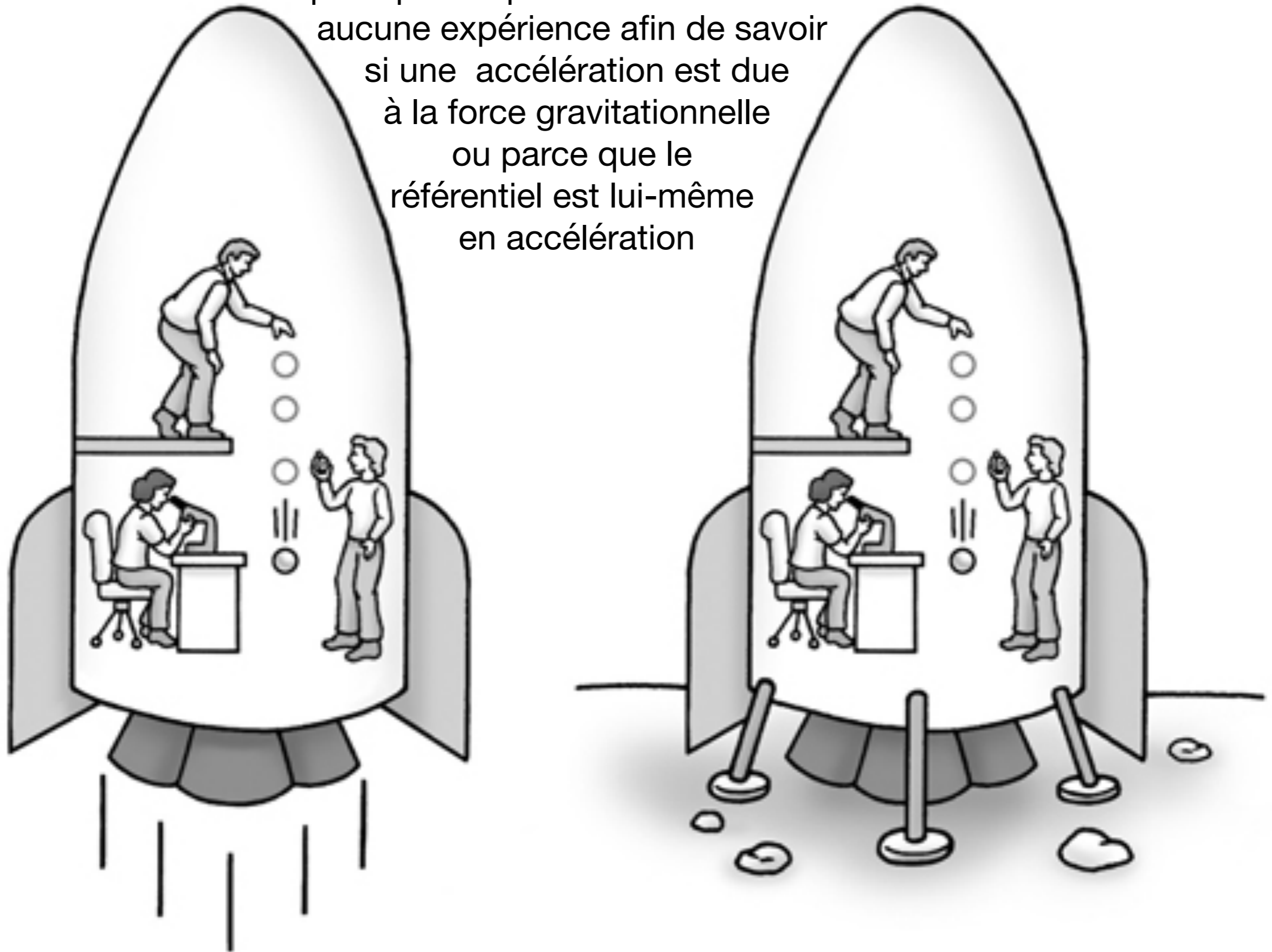


la relativité (restreinte)  
= une nouvelle géométrie

$$\text{événement} = \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

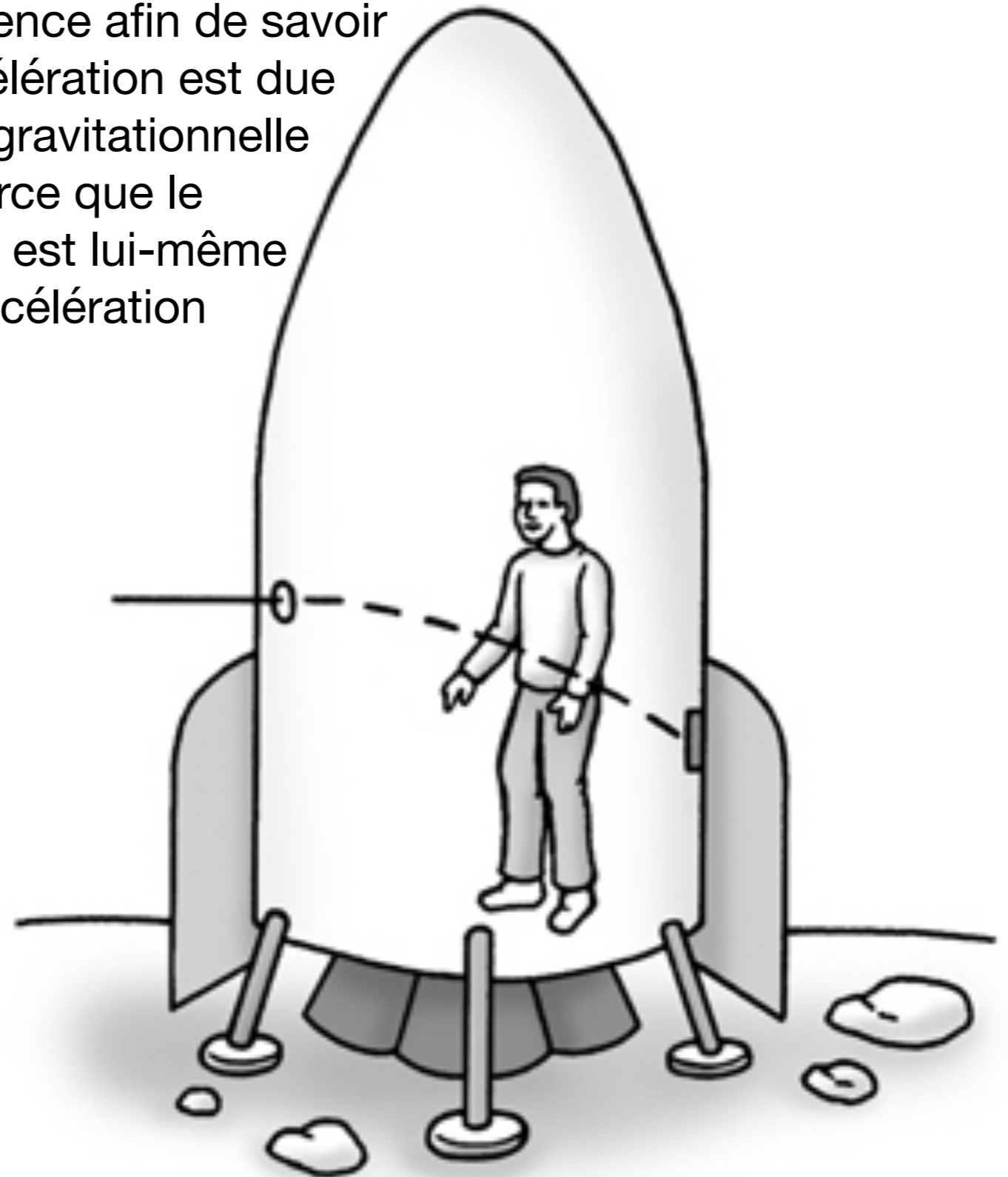
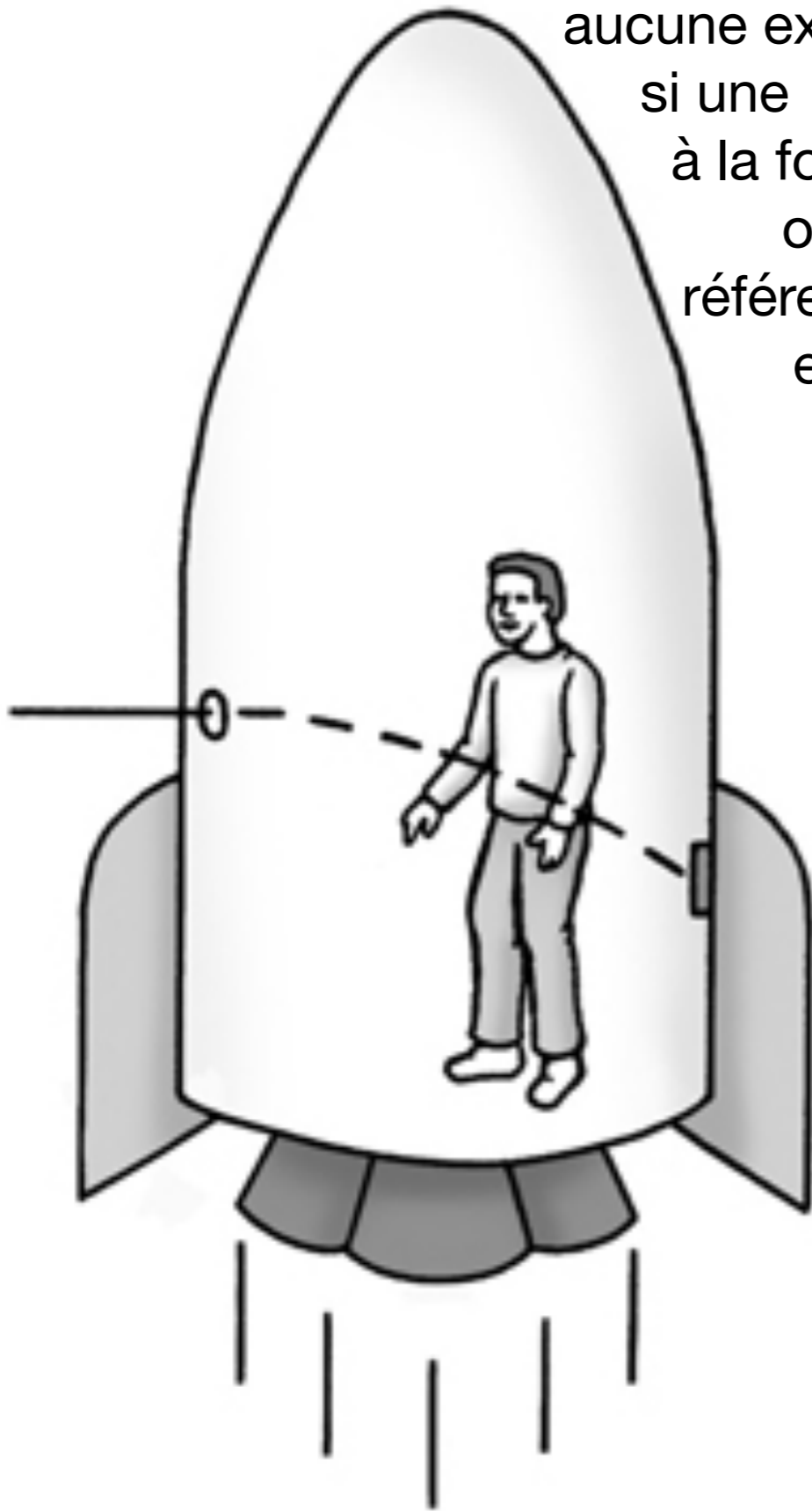


principe d'équivalence : il n'existe aucune expérience afin de savoir si une accélération est due à la force gravitationnelle ou parce que le référentiel est lui-même en accélération

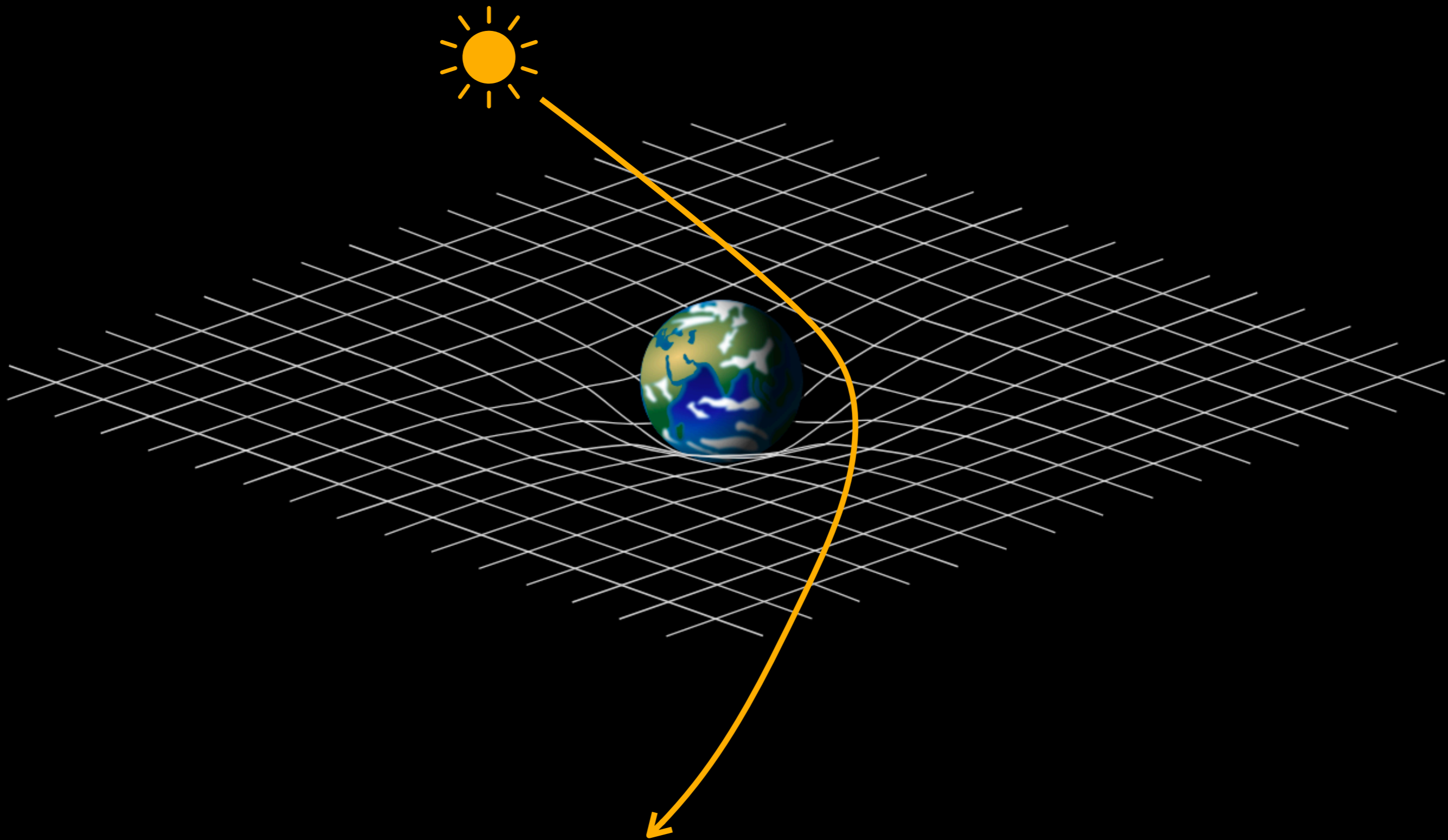




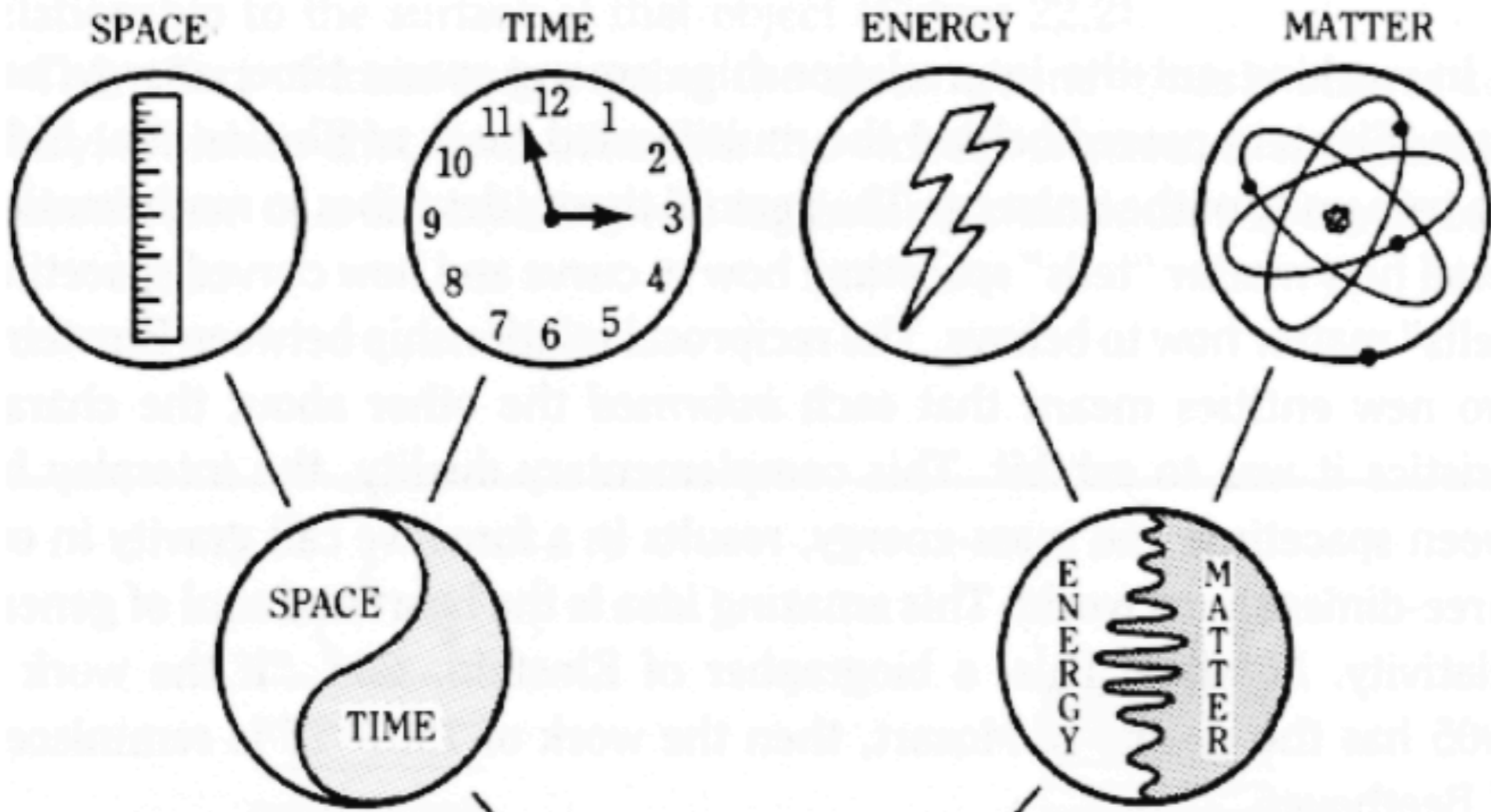
principe d'équivalence : il n'existe aucune expérience afin de savoir si une accélération est due à la force gravitationnelle ou parce que le référentiel est lui-même en accélération





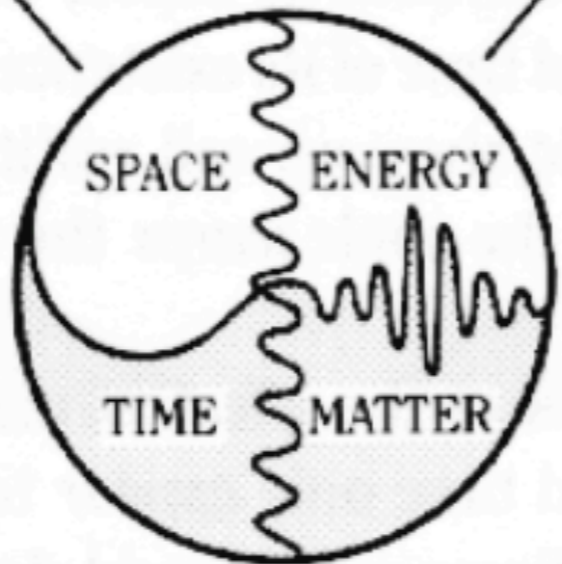






1905 SPECIAL THEORY OF RELATIVITY

1905 ENERGY-MASS EQUIVALENCE



1915 GENERAL THEORY OF RELATIVITY

géométrie de l'espace-temps

$$G_{\mu\nu}$$

=

$$\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

contenu énergétique

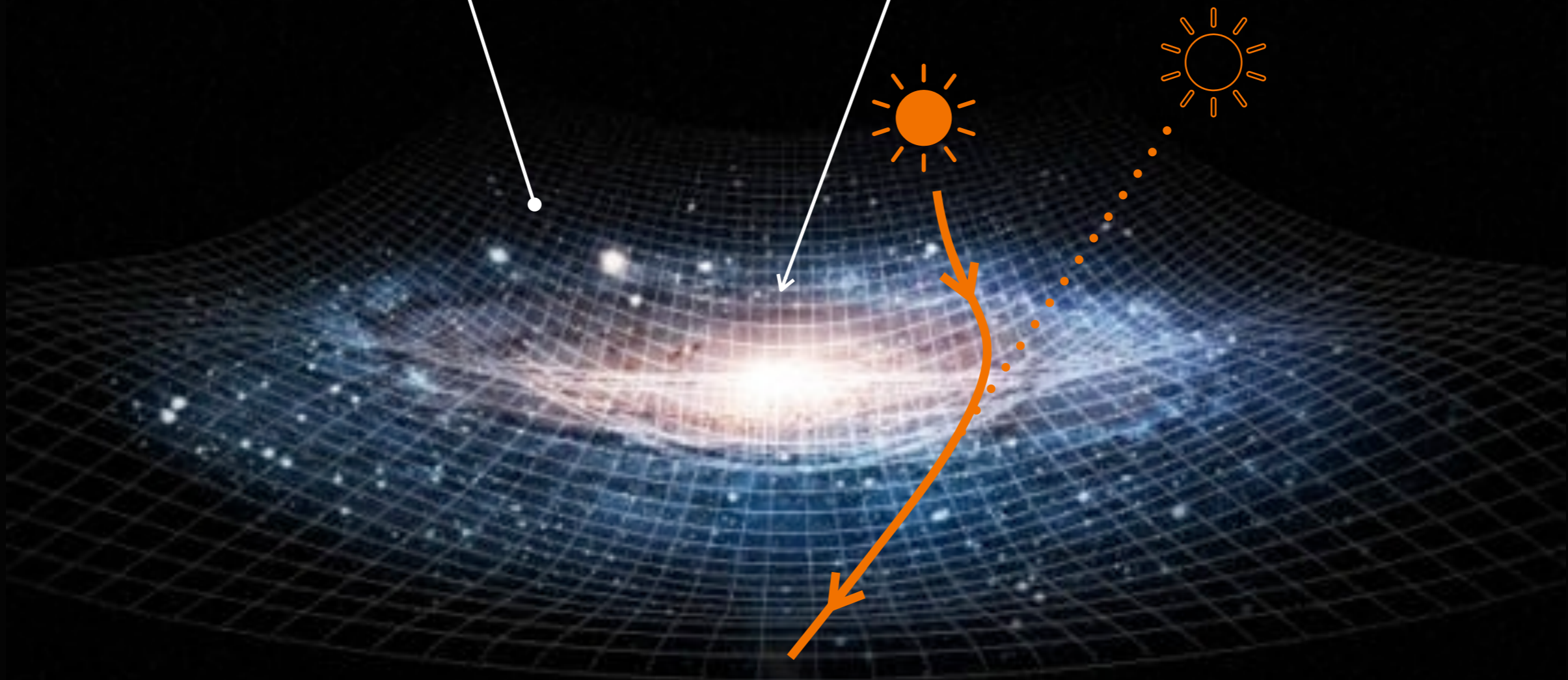


# l'espace-temps, nouvelle description de la gravité





$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



l'espace-temps, nouvelle description de la gravité





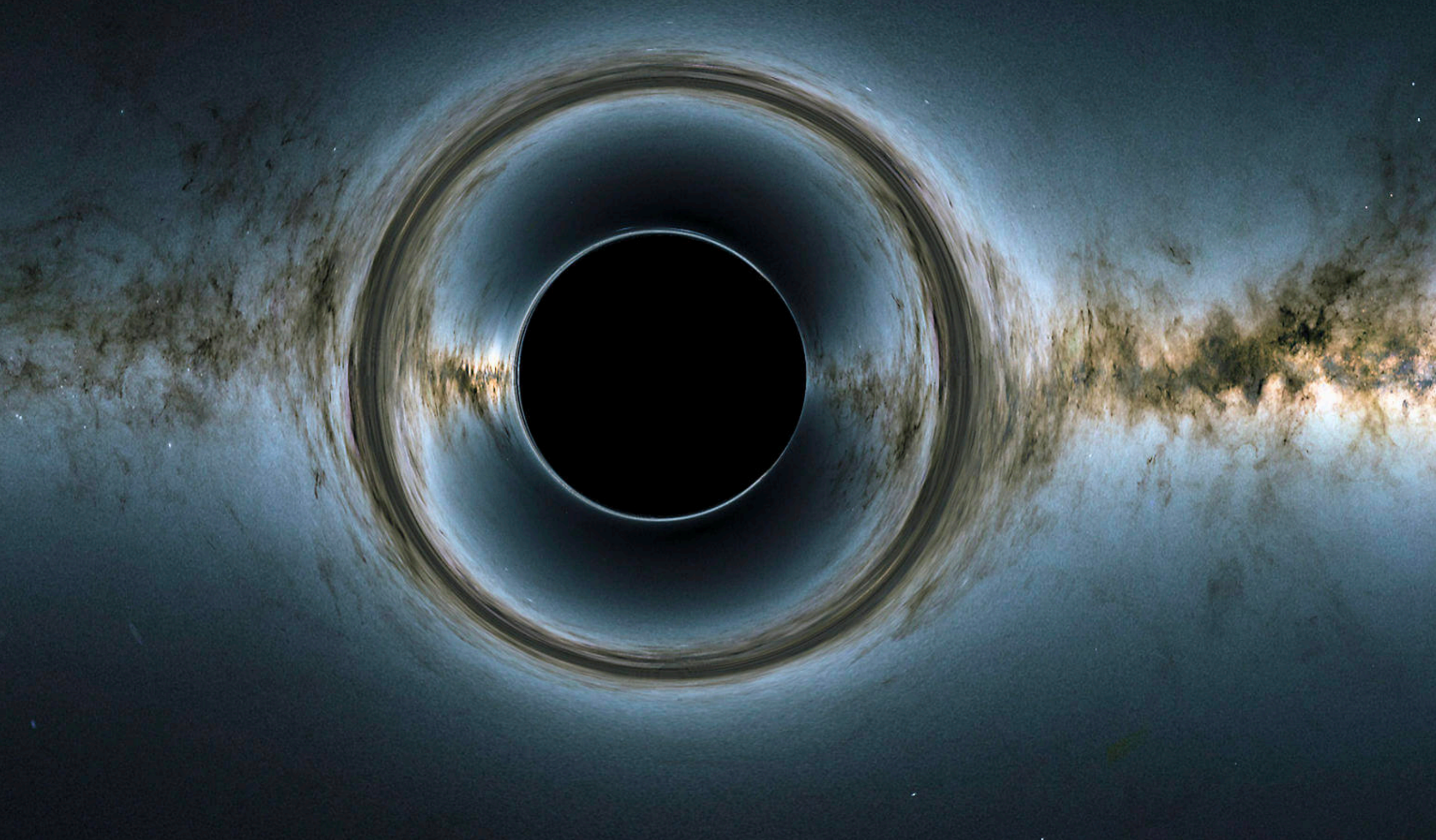
**Euclid**

**Vera Rubin Observatory (LSST)**



$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**les trous noirs**





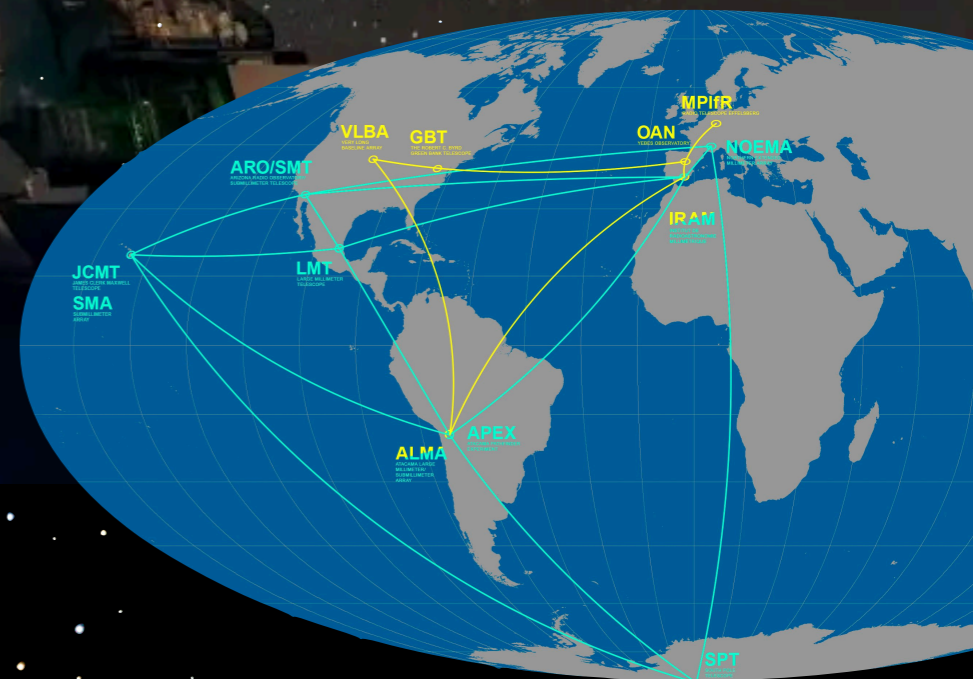
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**l'espace-temps peut trembler**





**les trous noirs ont une réalité physique**







# les trous noirs ont une réalité physique

J. Errard — Teaching the Universe — 18 janvier 2024

**EHT Collaboration**



# le modèle du Big Bang



Quelle application  
pour la cosmologie?

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

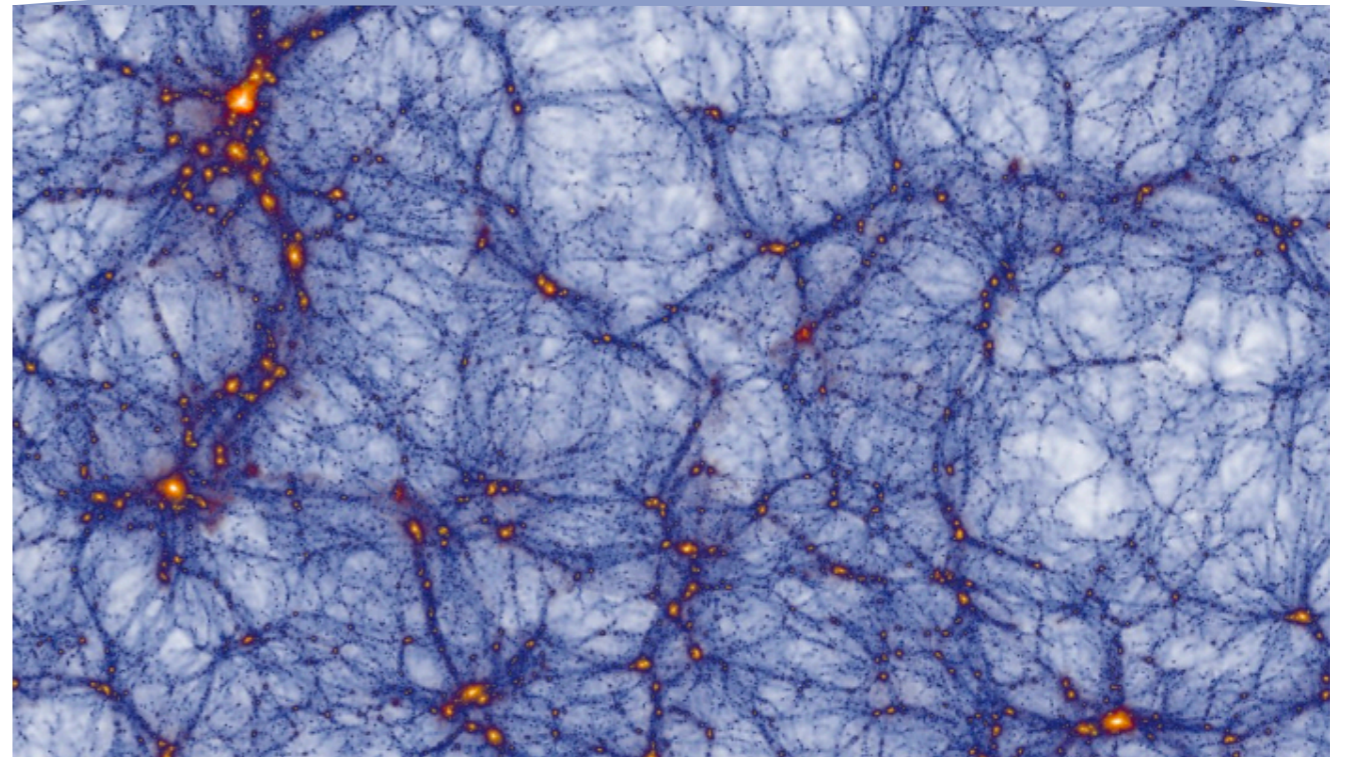


hypothèse : l'Univers est globalement homogène  
aux grandes échelles, nous n'y occupons pas une  
place privilégiée : c'est le principe cosmologique





$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$  Univers homogène



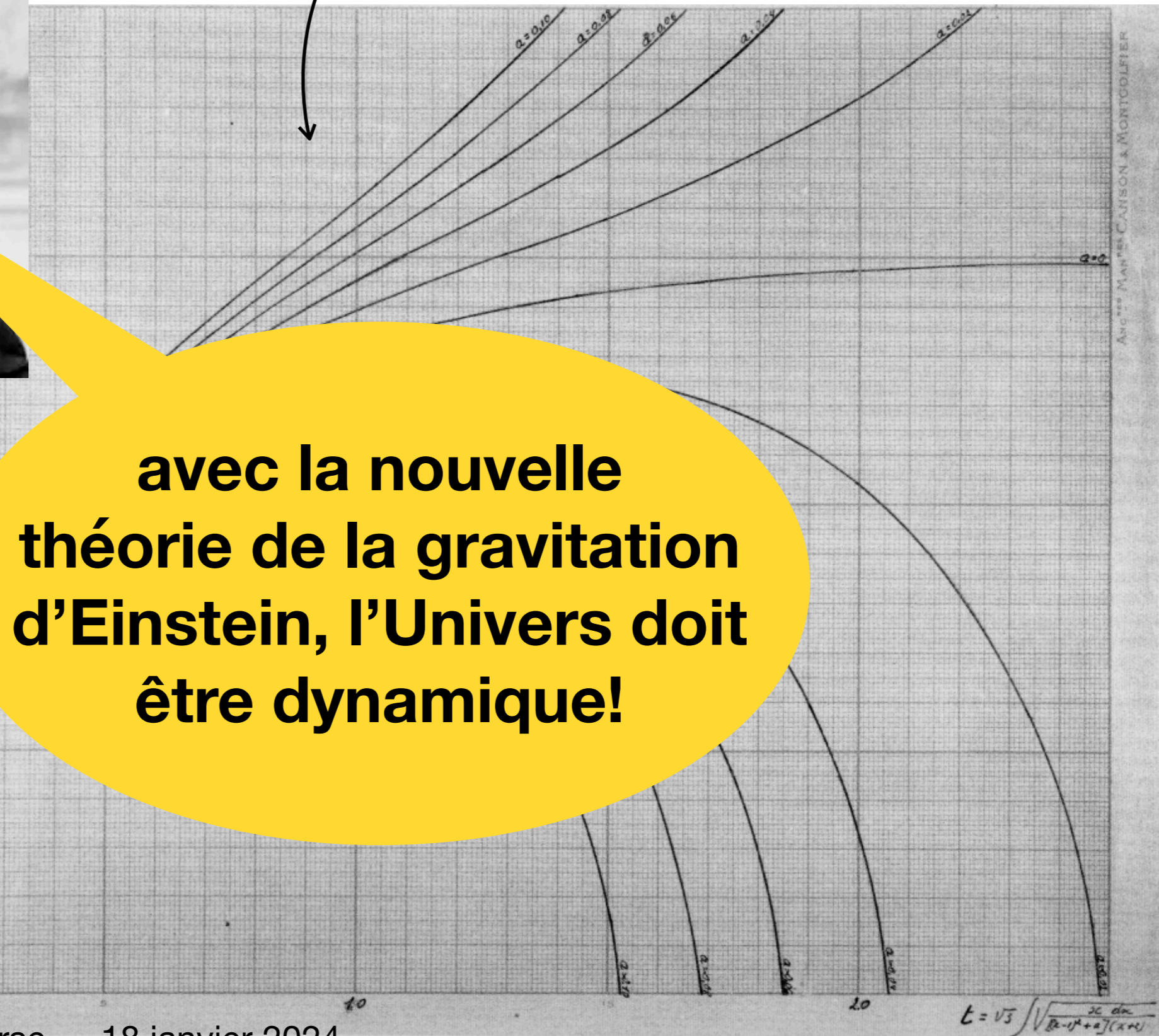




Georges Lemaître (1894-1966)

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Univers homogène



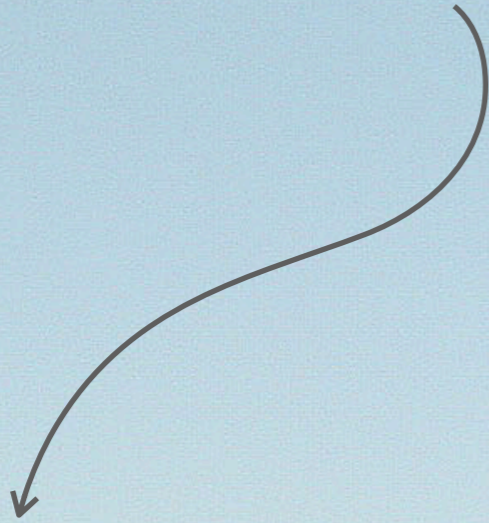
**avec la nouvelle  
théorie de la gravitation  
d'Einstein, l'Univers doit  
être dynamique!**

taille de l'Univers ↑

temps →



# Mont Wilson à Los Angeles



**Henrietta Swan Leavitt**  
(1868-1921)

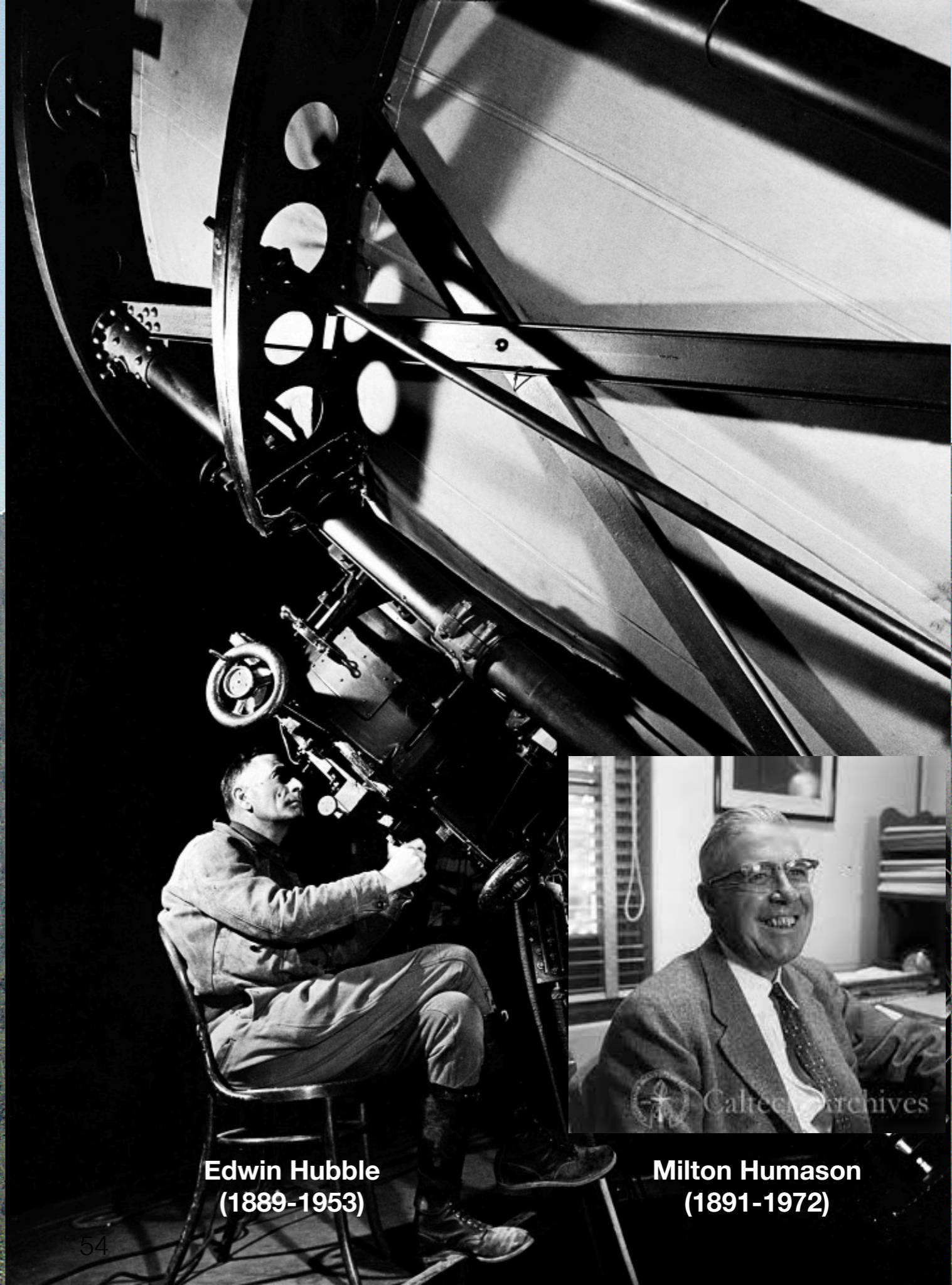


**mesure des distances grâce aux Céphéides**

**Vesto Melvin Slipher**  
(1875-1969)



**décalage vers le rouge des nébuleuses**

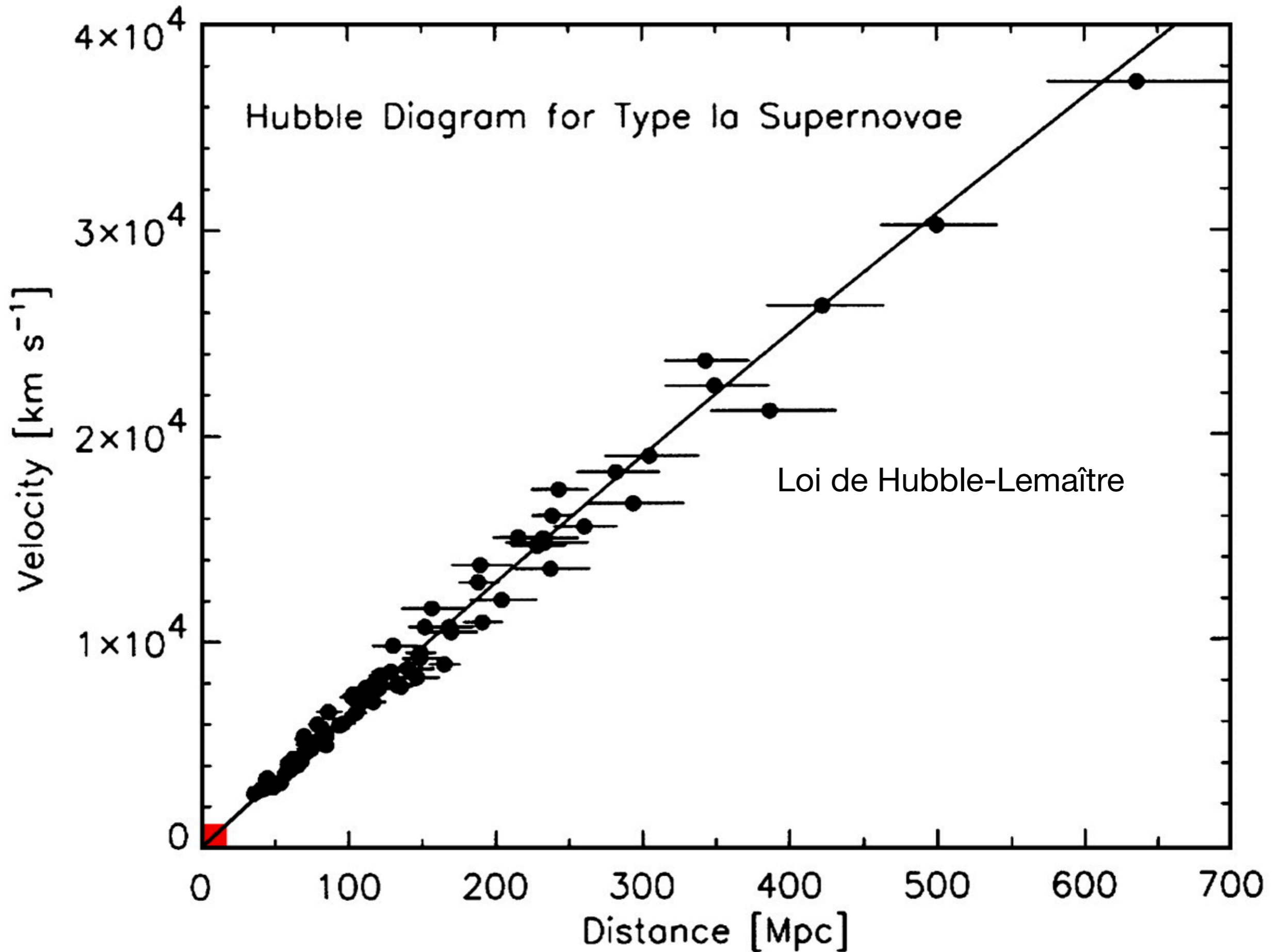


**Edwin Hubble**  
(1889-1953)



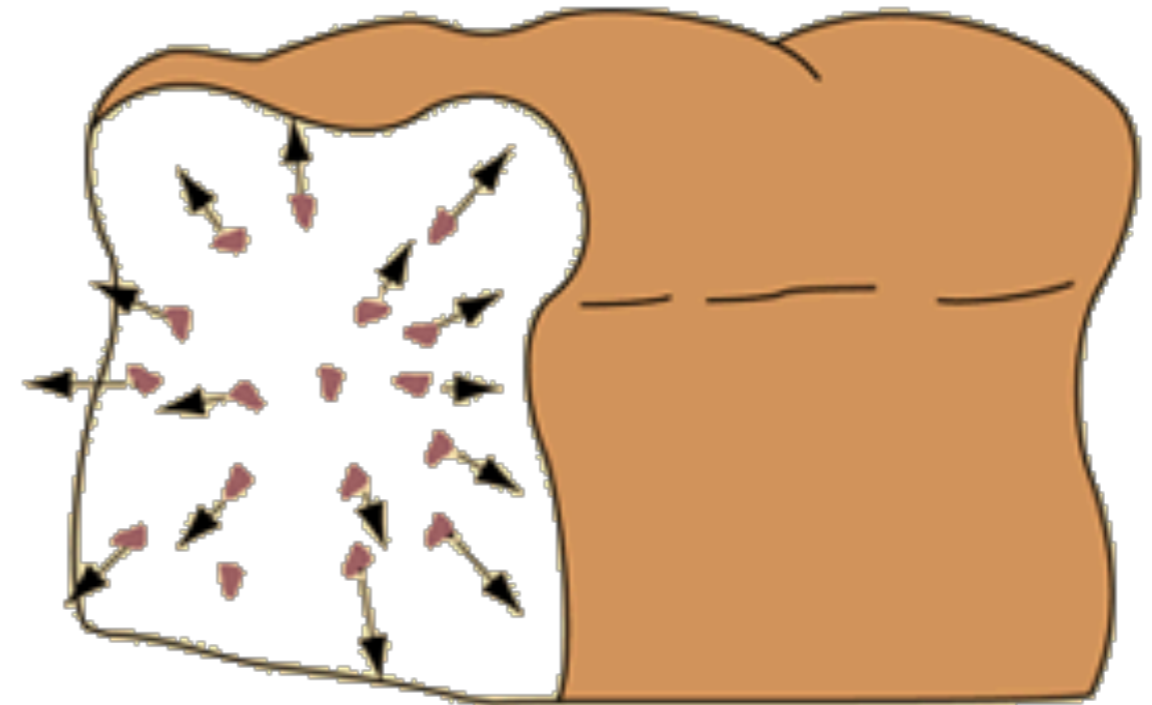
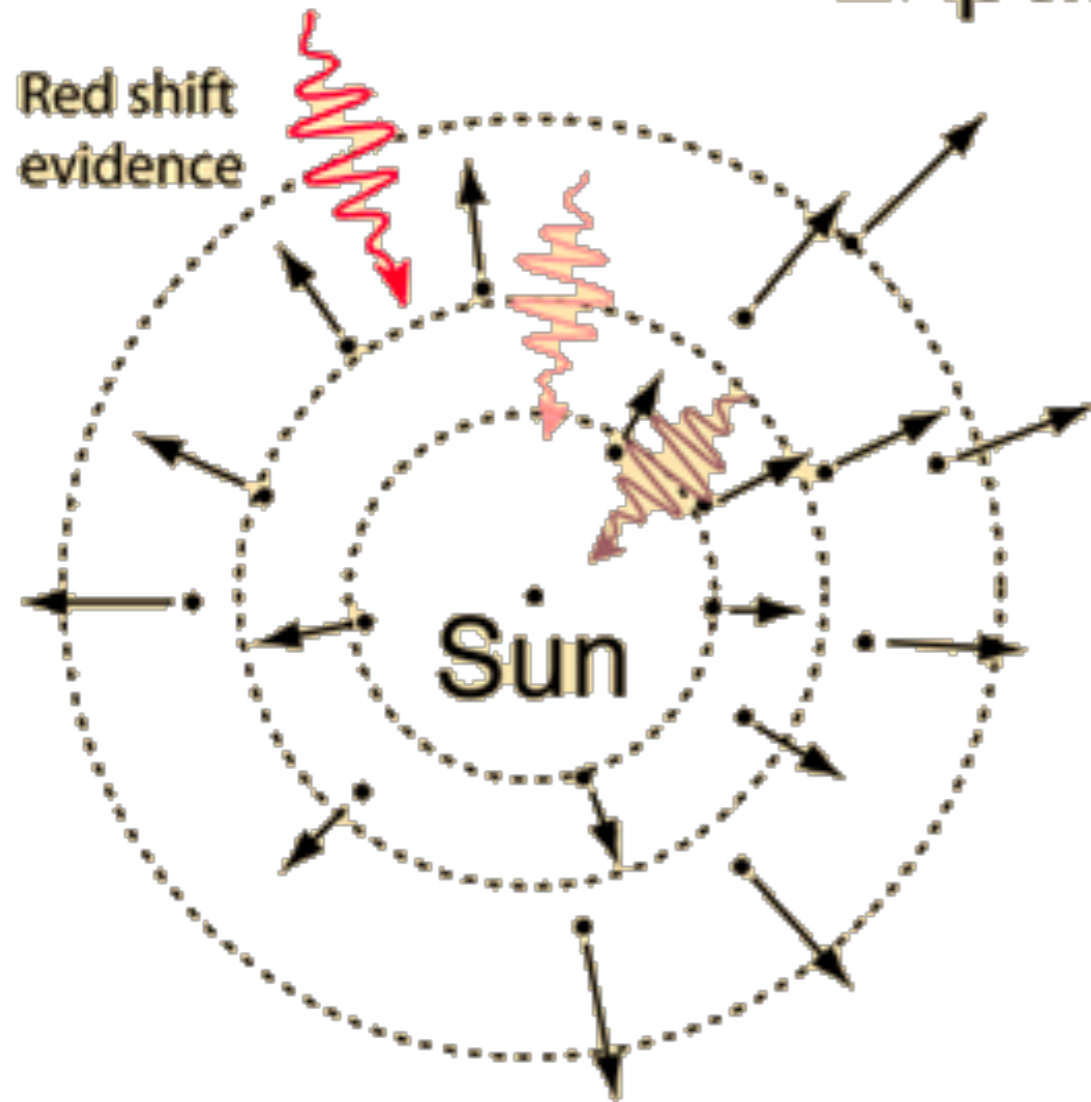
**Milton Humason**  
(1891-1972)







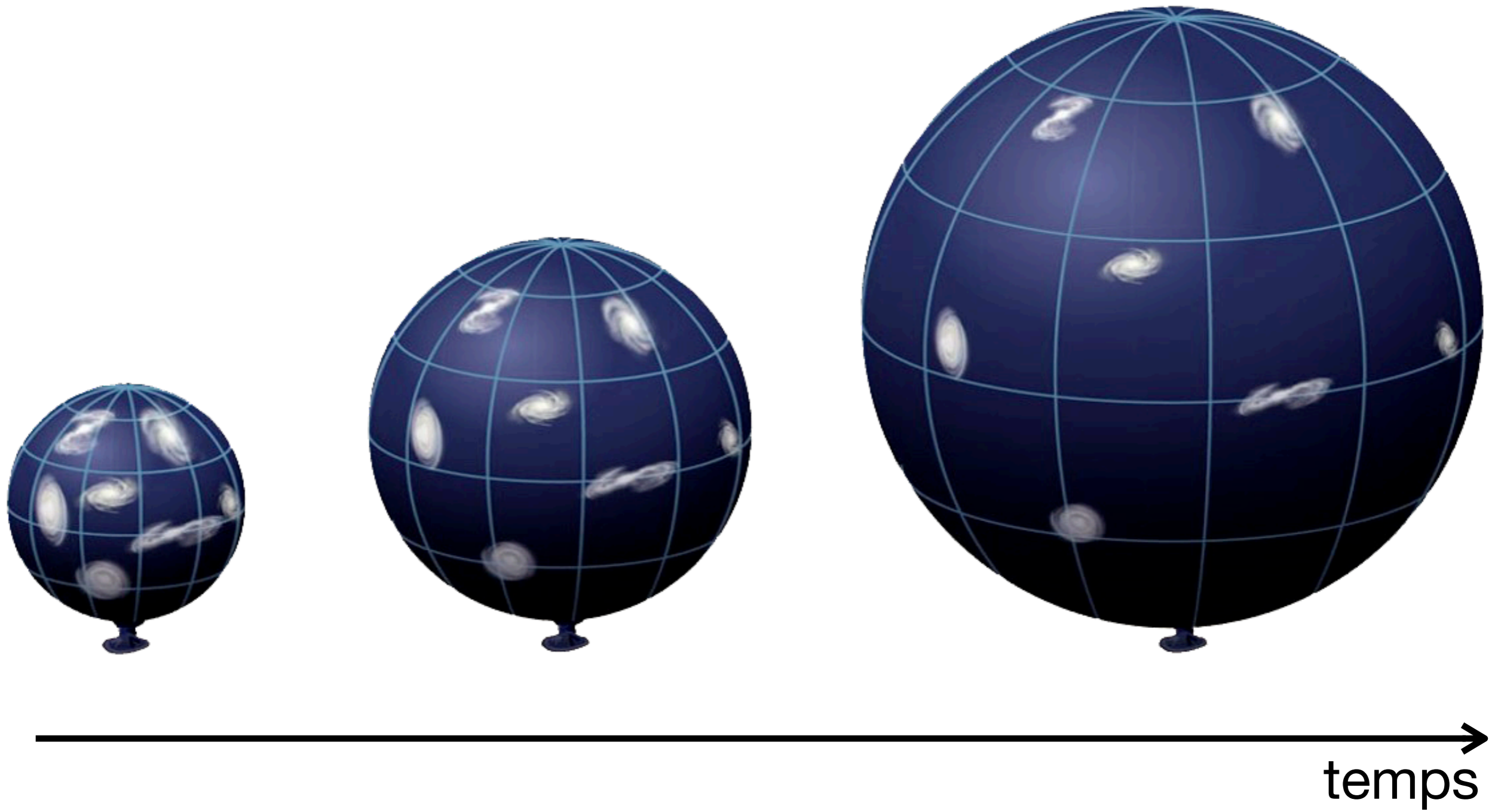
# Expanding universe



Every raisin in a rising loaf of raisin bread will see every other raisin expanding away from it.

$$H = 71 \text{ km/s/Mpc}$$







# la théorie du Big Bang



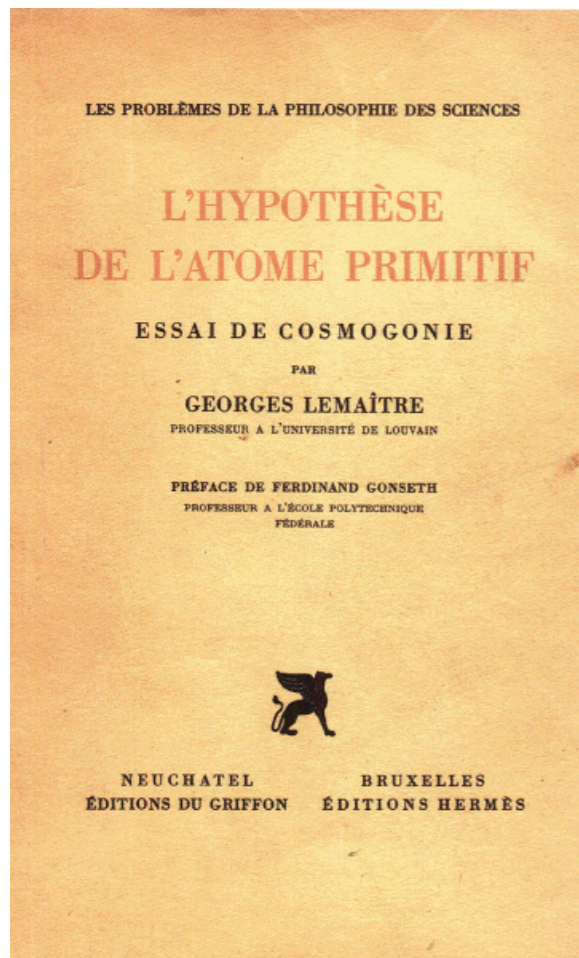
**expansion  
de l'espace-  
temps**

**Loi de Hubble-Lemaître**

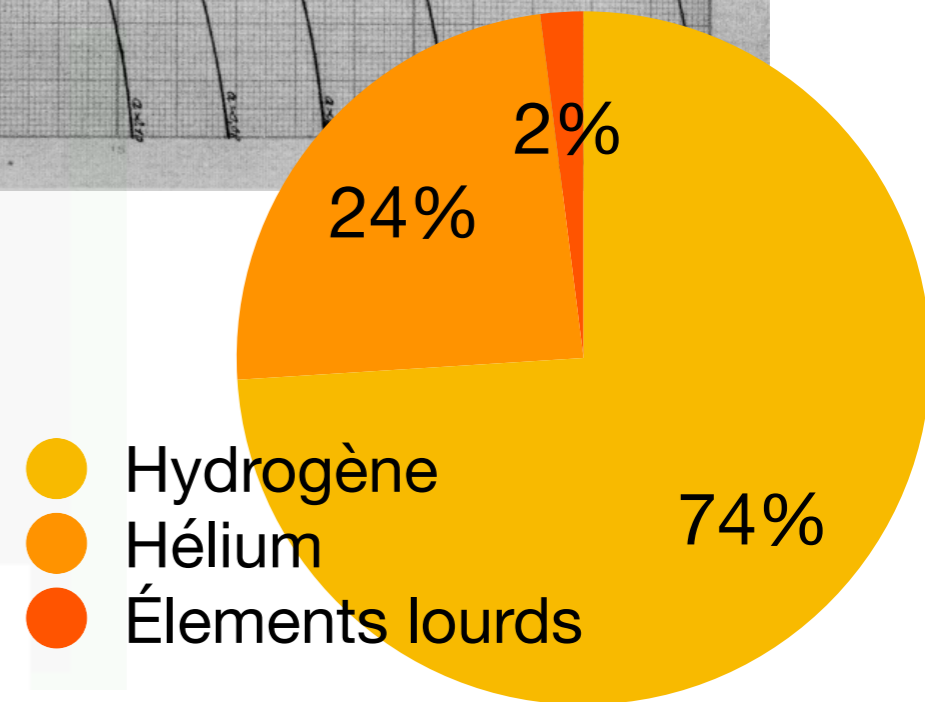
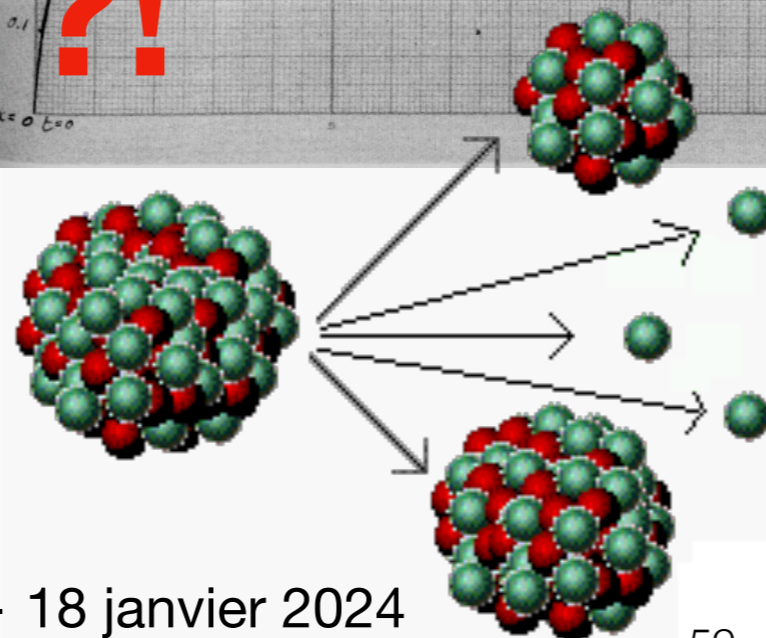
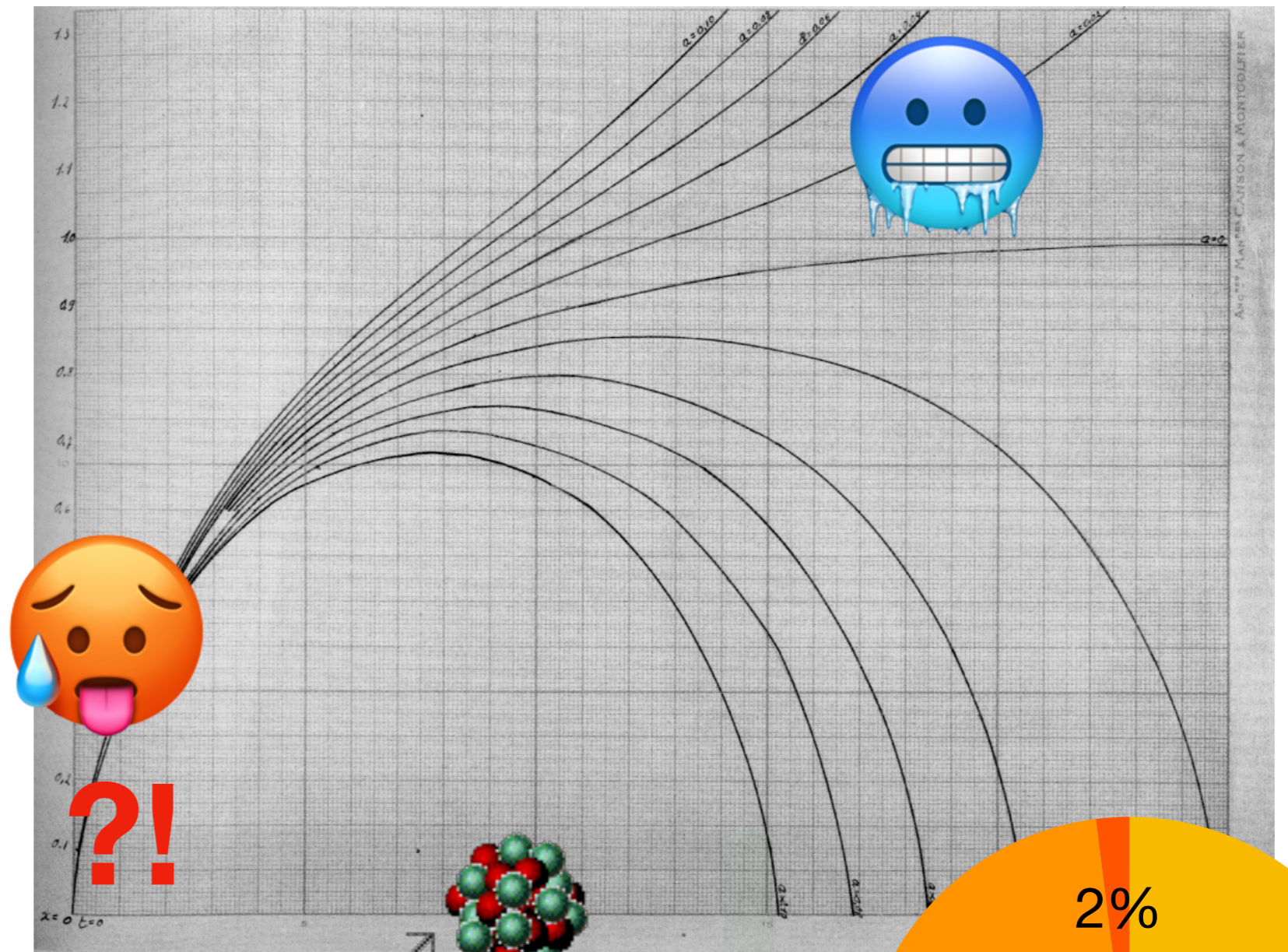




Georges Lemaître  
(1894-1966)



$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

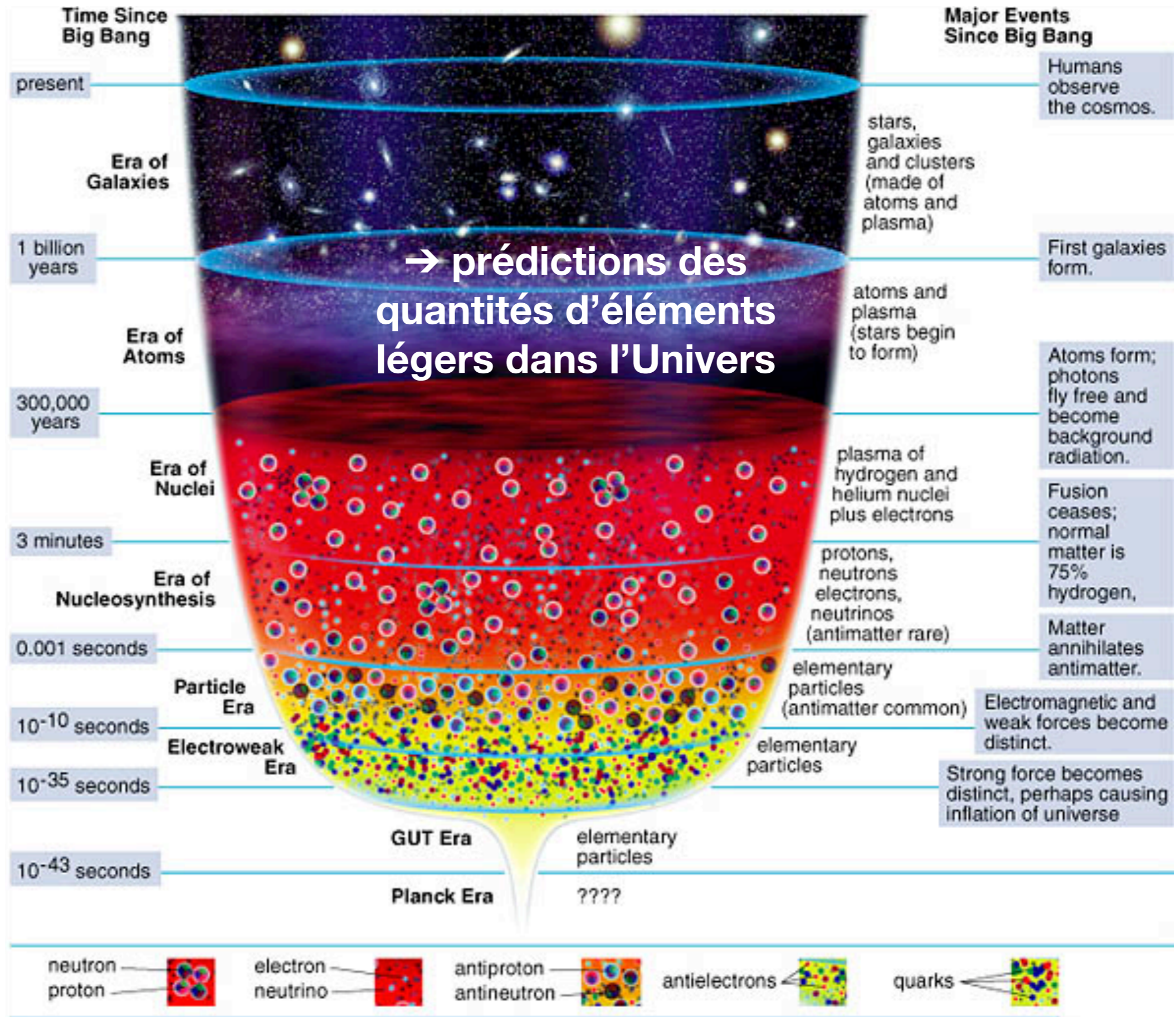




Georges Gamow  
(1904-1968)

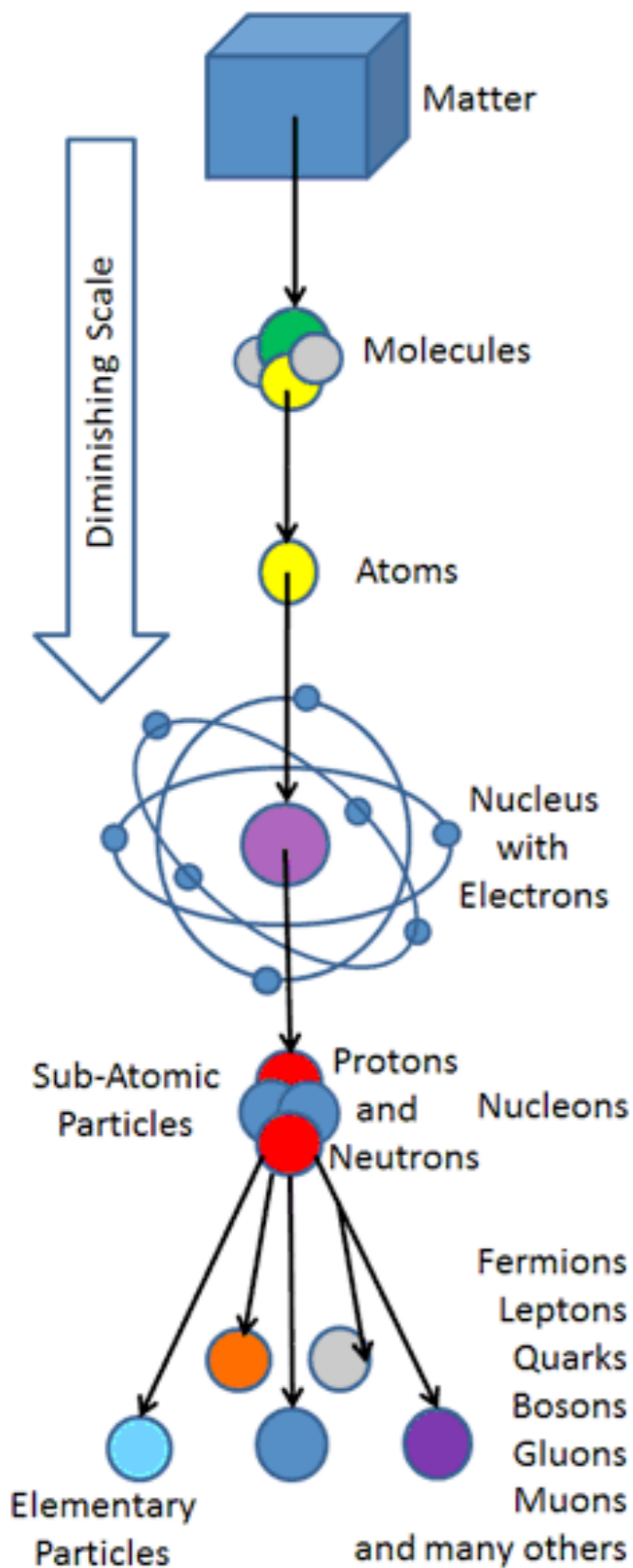


“Les éléments chimiques ont été cuisinés en moins de temps qu’il n’en faut pour faire cuire un oeuf”



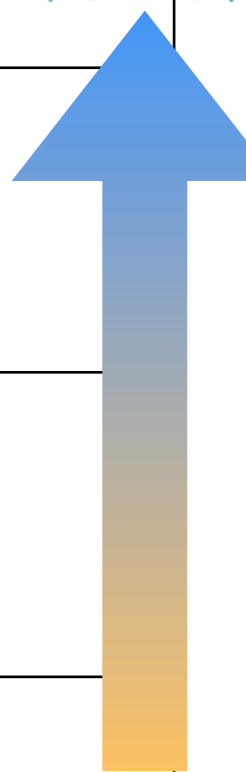


# Particle Hierarchy



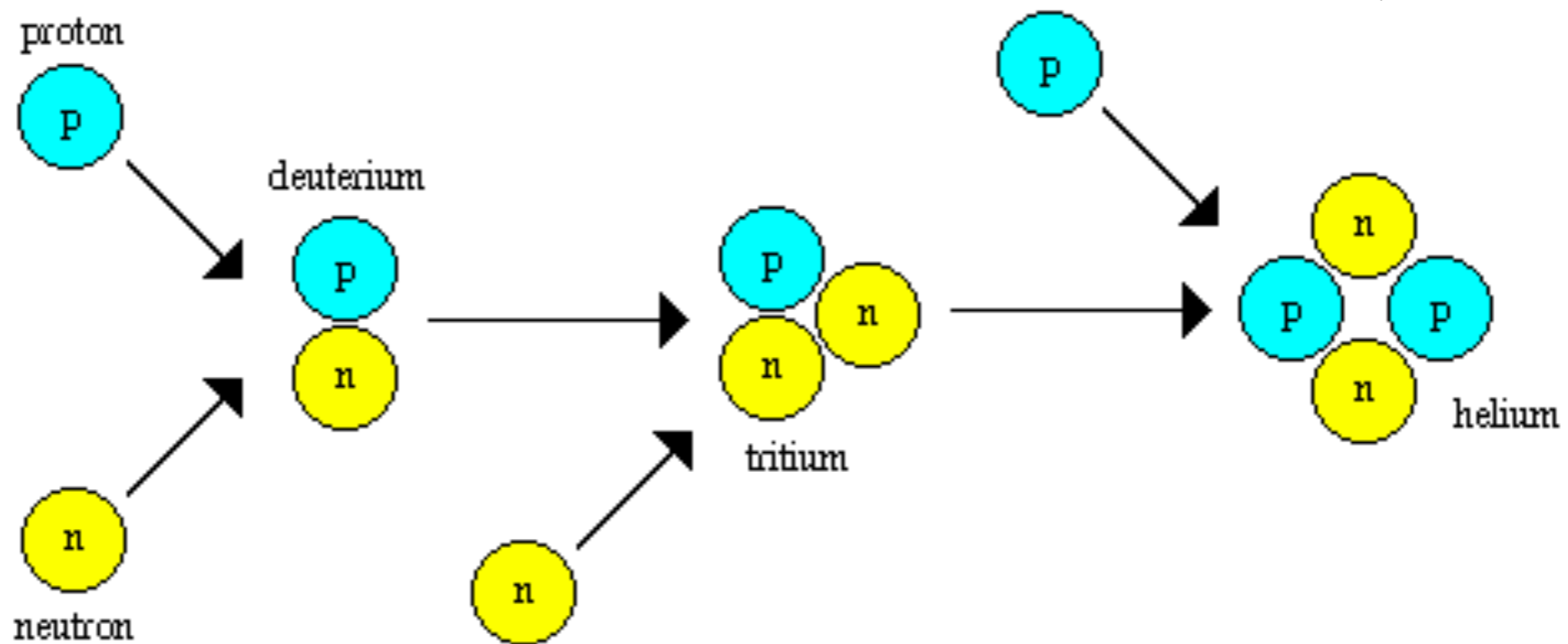
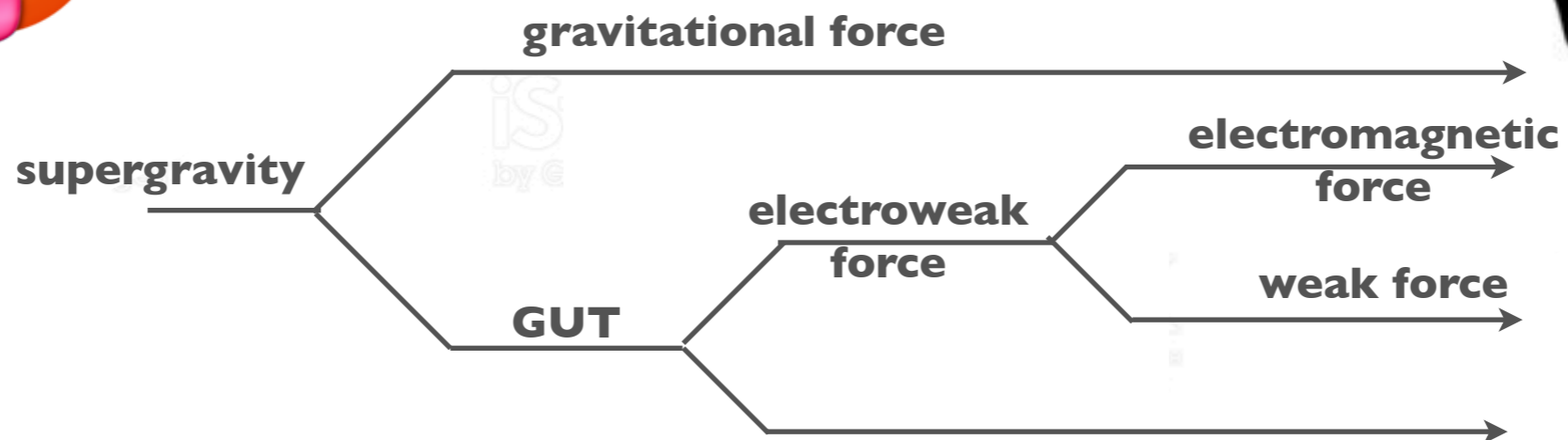
Pour comprendre la physique du plasma dense et chaud, il faut parler d'énergie/de température de liaison

	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





# la nucléosynthèse en résumé







# Planck epoch Quantum Gravity?



# la théorie du Big Bang



Loi de Hubble-Lemaître

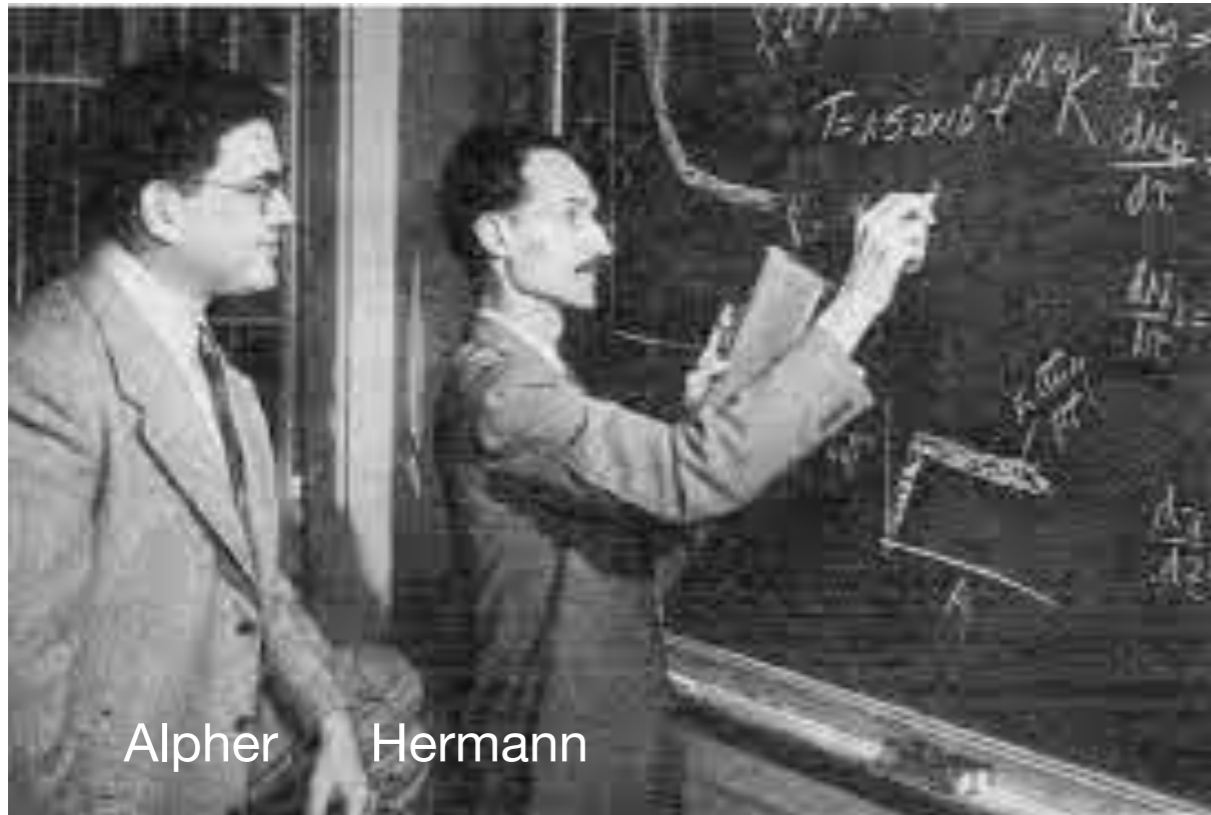
expansion  
de l'espace-  
temps

nucléosynthèse  
primordiale

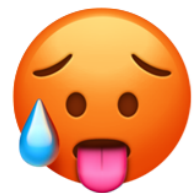


Gamow, Alpher, Hermann

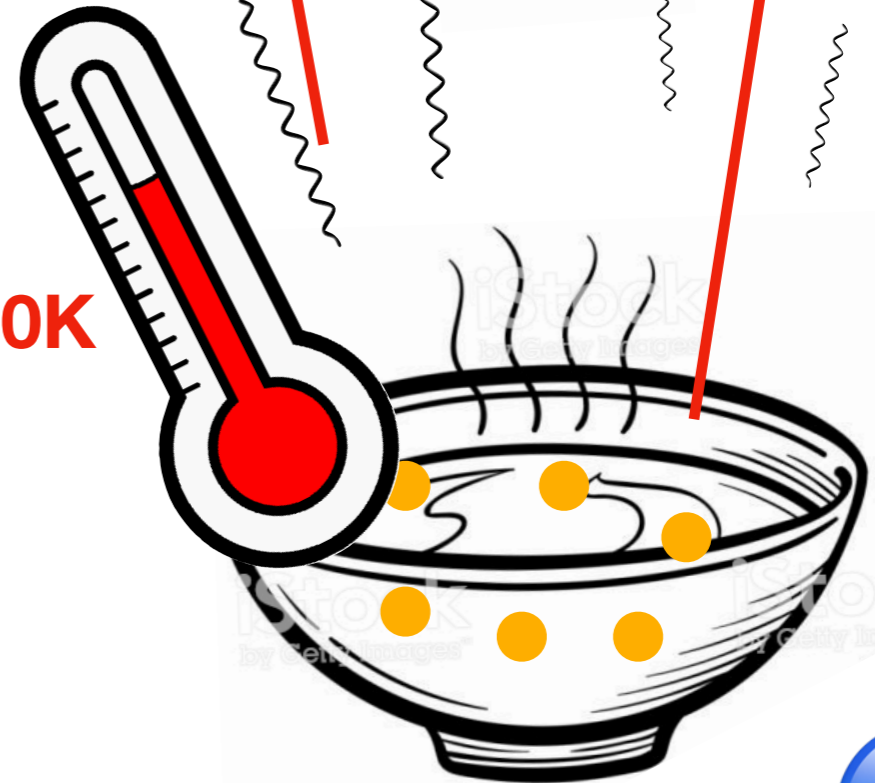




Alpher Hermann



3000K



temps

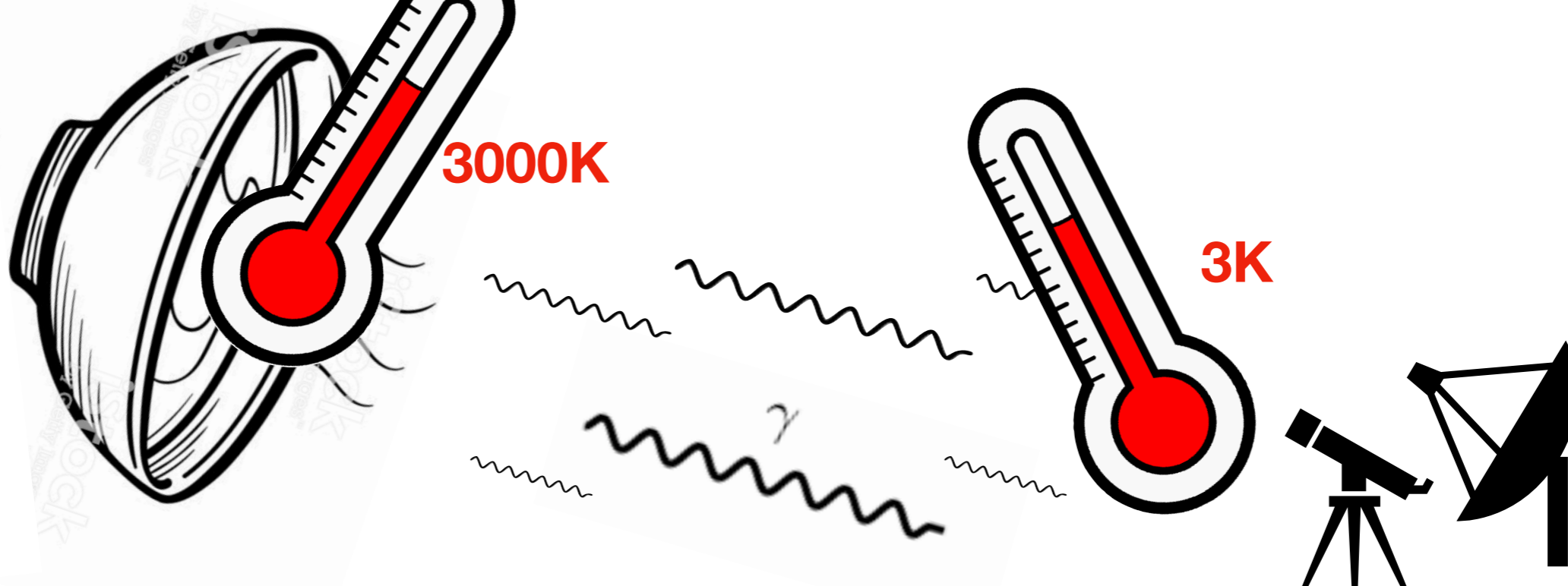


vers 377 000 ans, l'univers devient suffisamment froid pour que des atomes neutres se forment ("**recombinaison**") et, en conséquence, il devient également transparent pour la première fois.









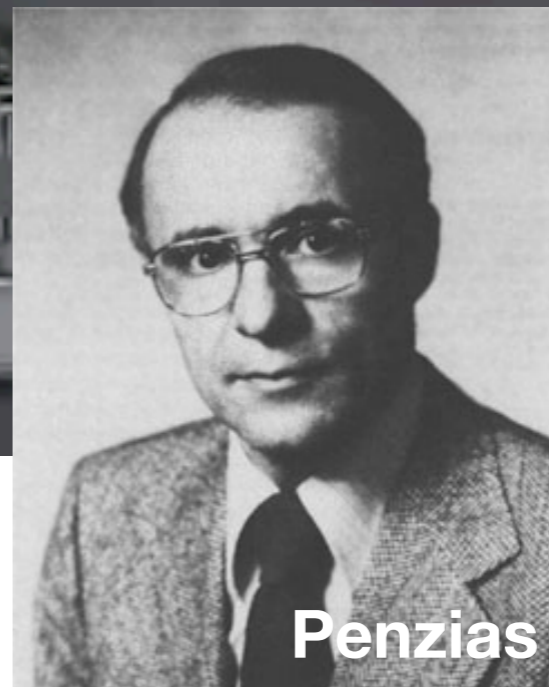
**le bol de soupe  
primordiale devrait nous  
apparaître sous la forme d'un  
rayonnement à quelques  
degrés au-dessus du zéro  
absolu**



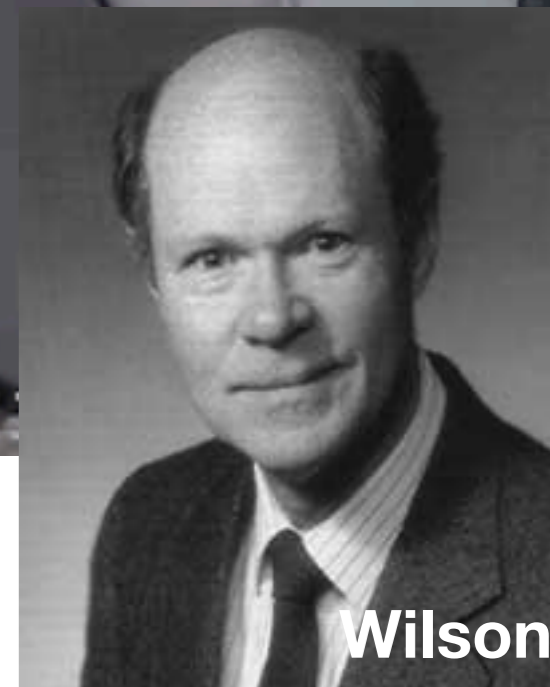


**1964-65**

J. Errard — Teaching the Universe — 18 janvier 2024



**Penzias**



**Wilson**



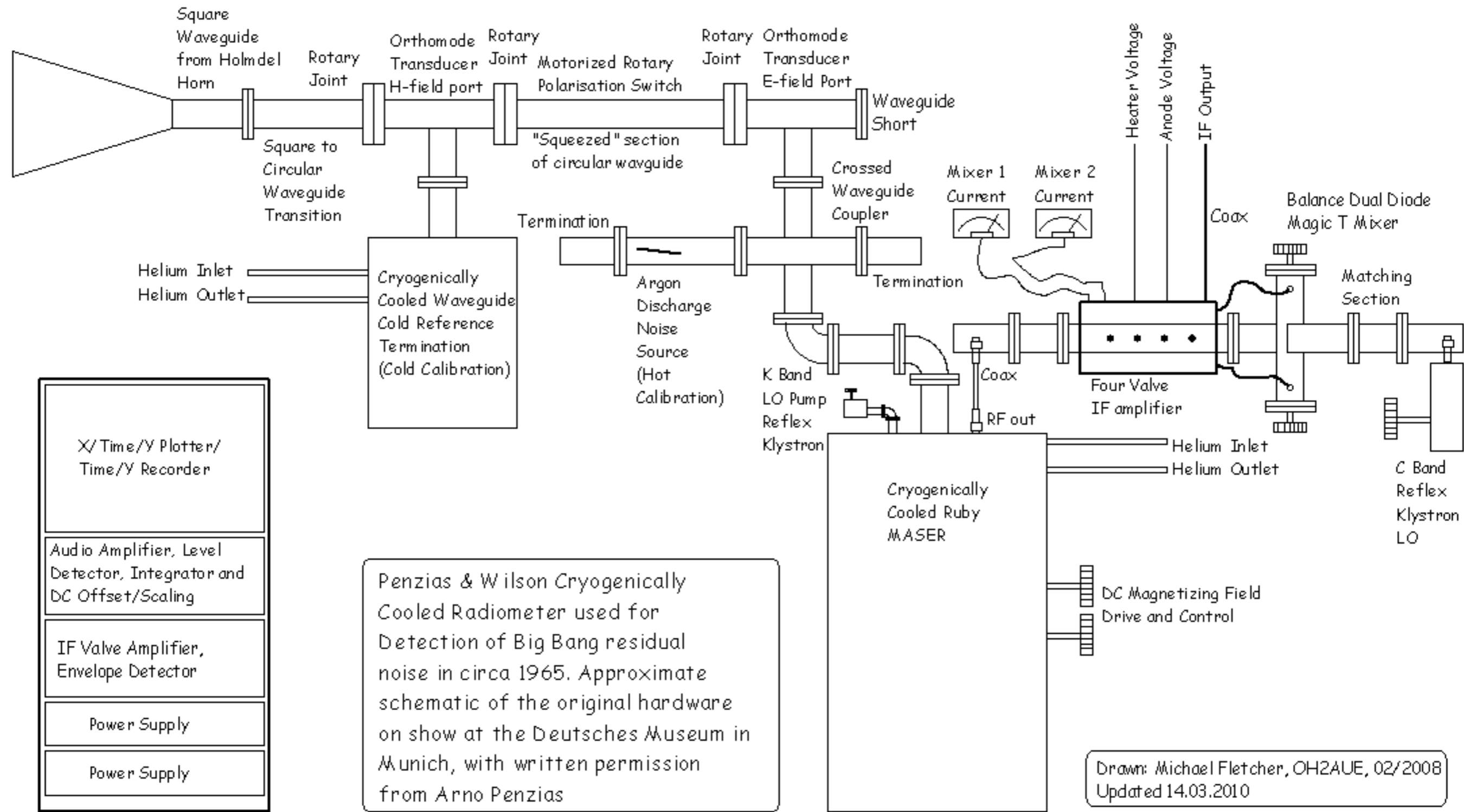
# Penzias & Wilson / Bell Labs Receiver at Deutsches Museum

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

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

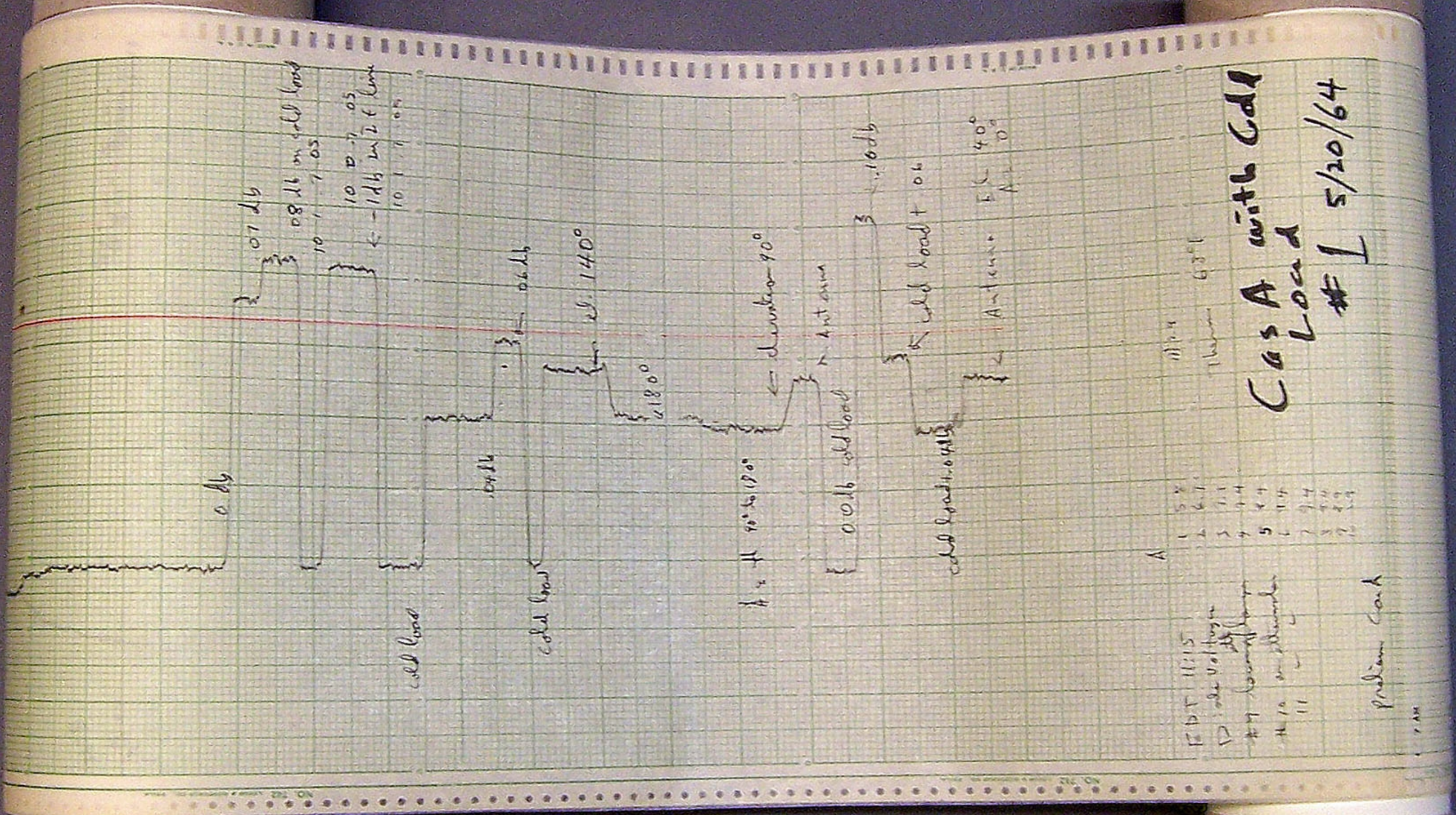








# Original Strip Chart of CMB Discovery



température observée vs estimation de l'émission atmosphérique / instrumentale

un bruit 100 fois supérieur aux attentes n'est pas normal !

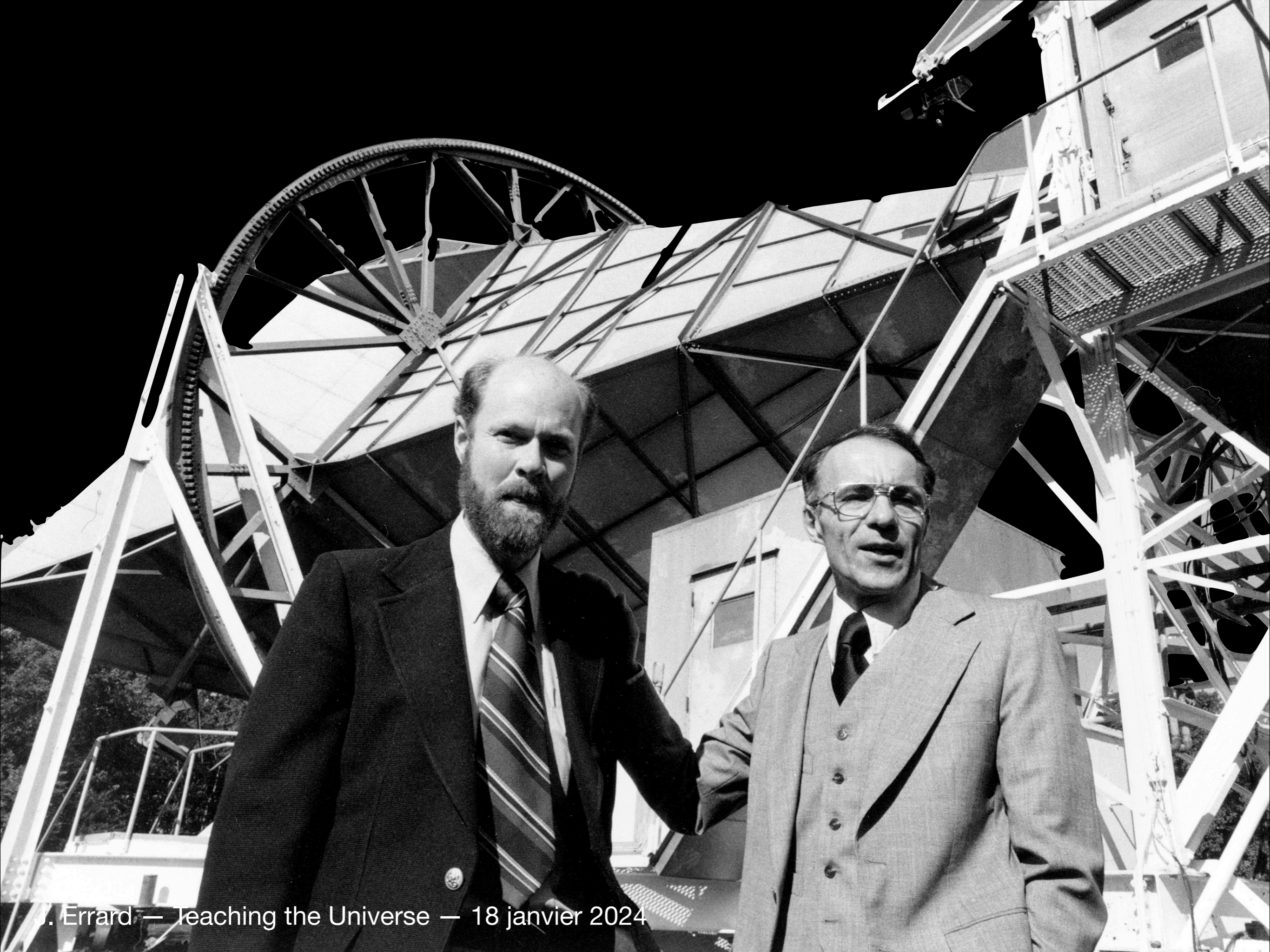




**View from inside the 20-foot Holmdel horn**

**Cleaning the antenna**



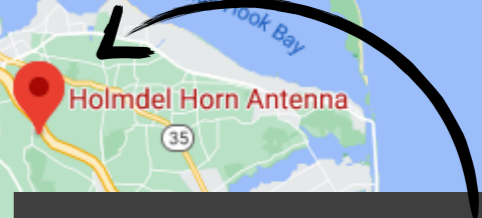
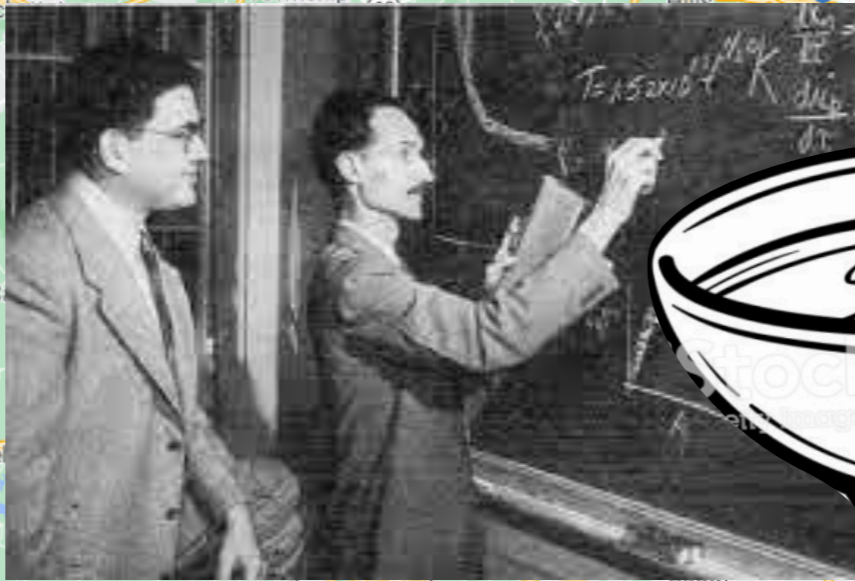
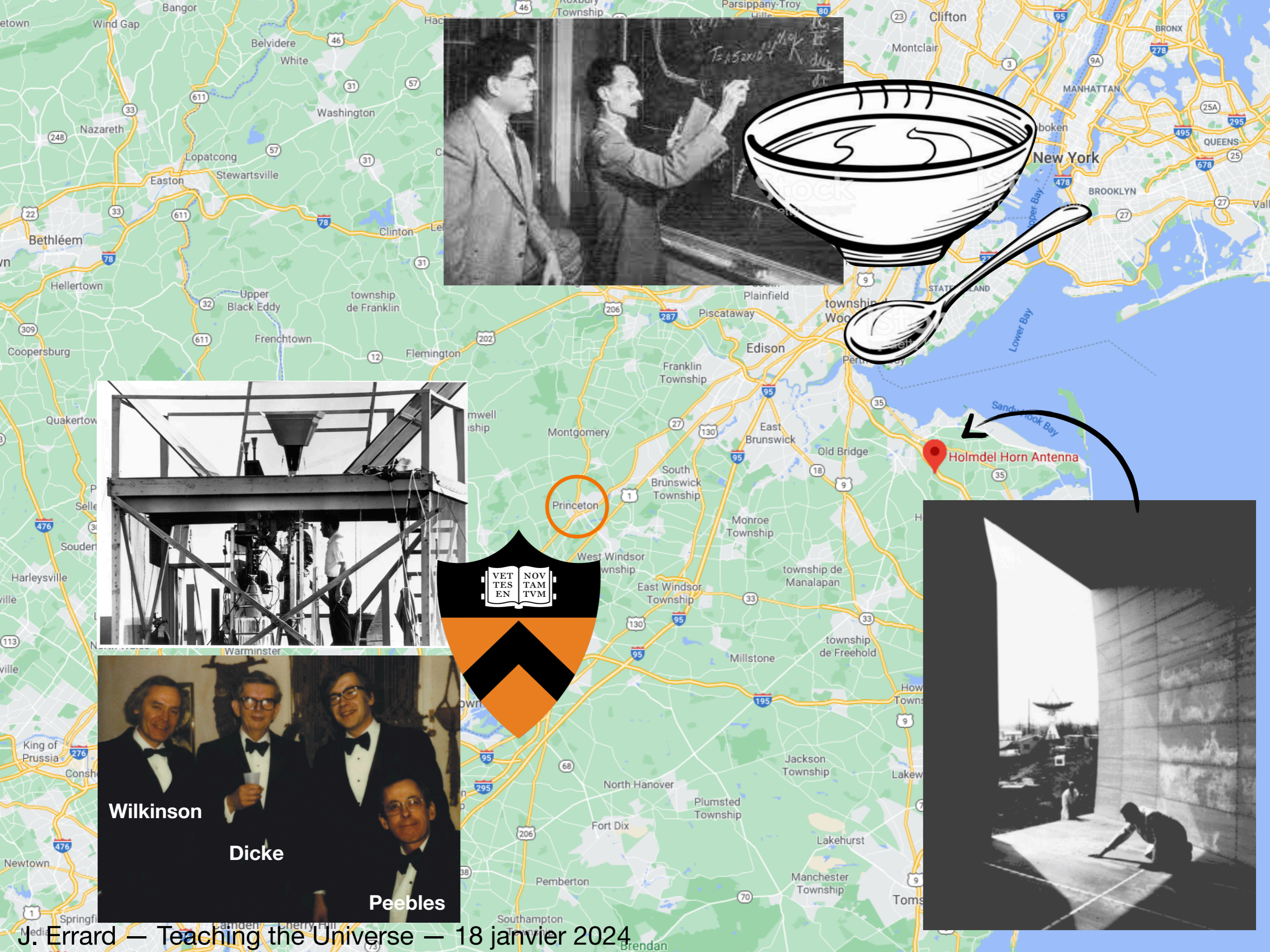




le ciel n'est pas noir!









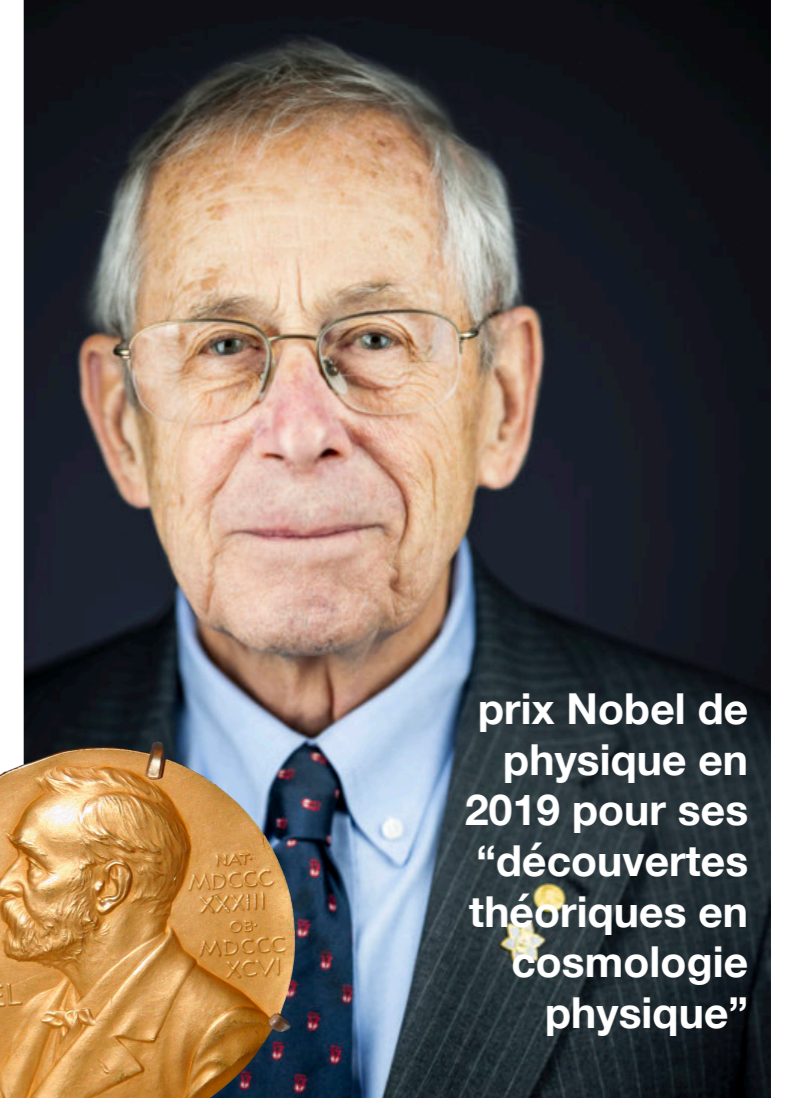
## Late 1964 – Connection Made

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  $3.5^{\circ}\text{K}$ . 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.

“Alors que toutes les données ne sont pas encore en main, nous proposons de présenter ici les conclusions possibles à tirer si nous supposons provisoirement que les mesures de Penzias et Wilson indiquent le rayonnement du corps noir à  $3,5\text{K}$ ”



prix Nobel de physique en 2019 pour ses “découvertes théoriques en cosmologie physique”

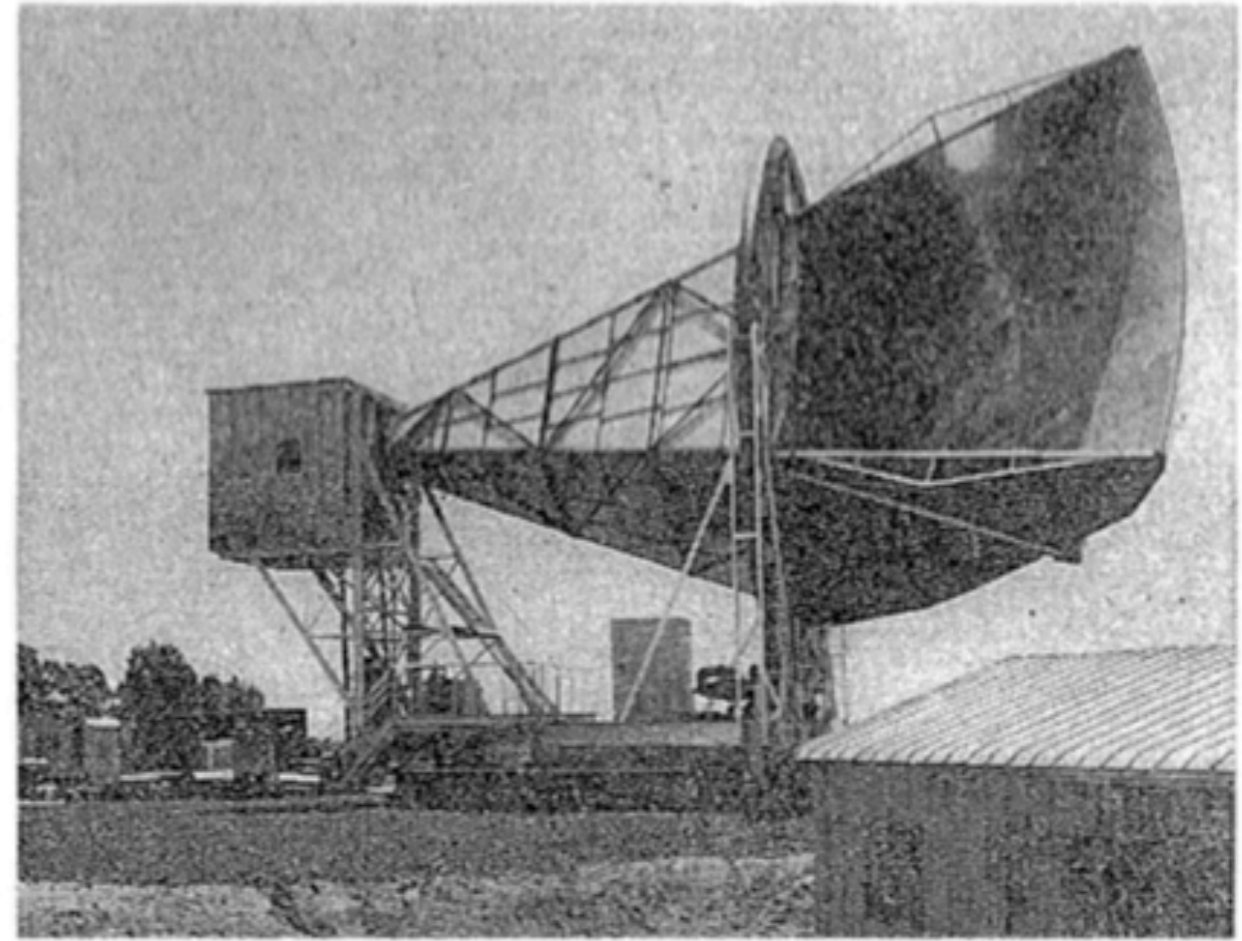




Arno Penzias &  
Bob Wilson



## 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

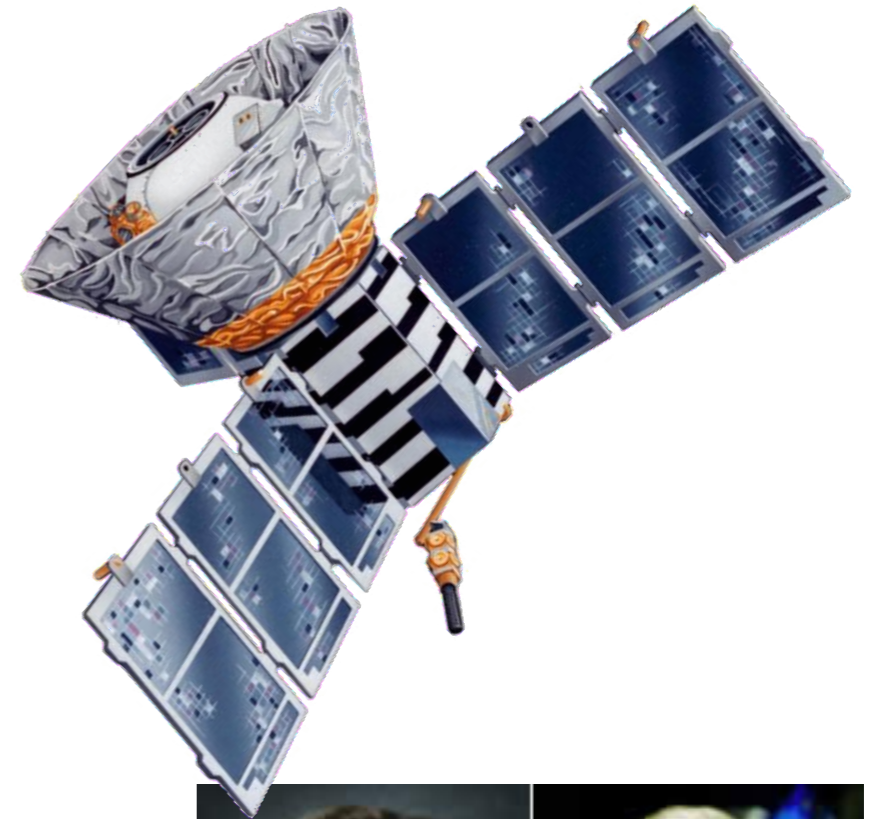
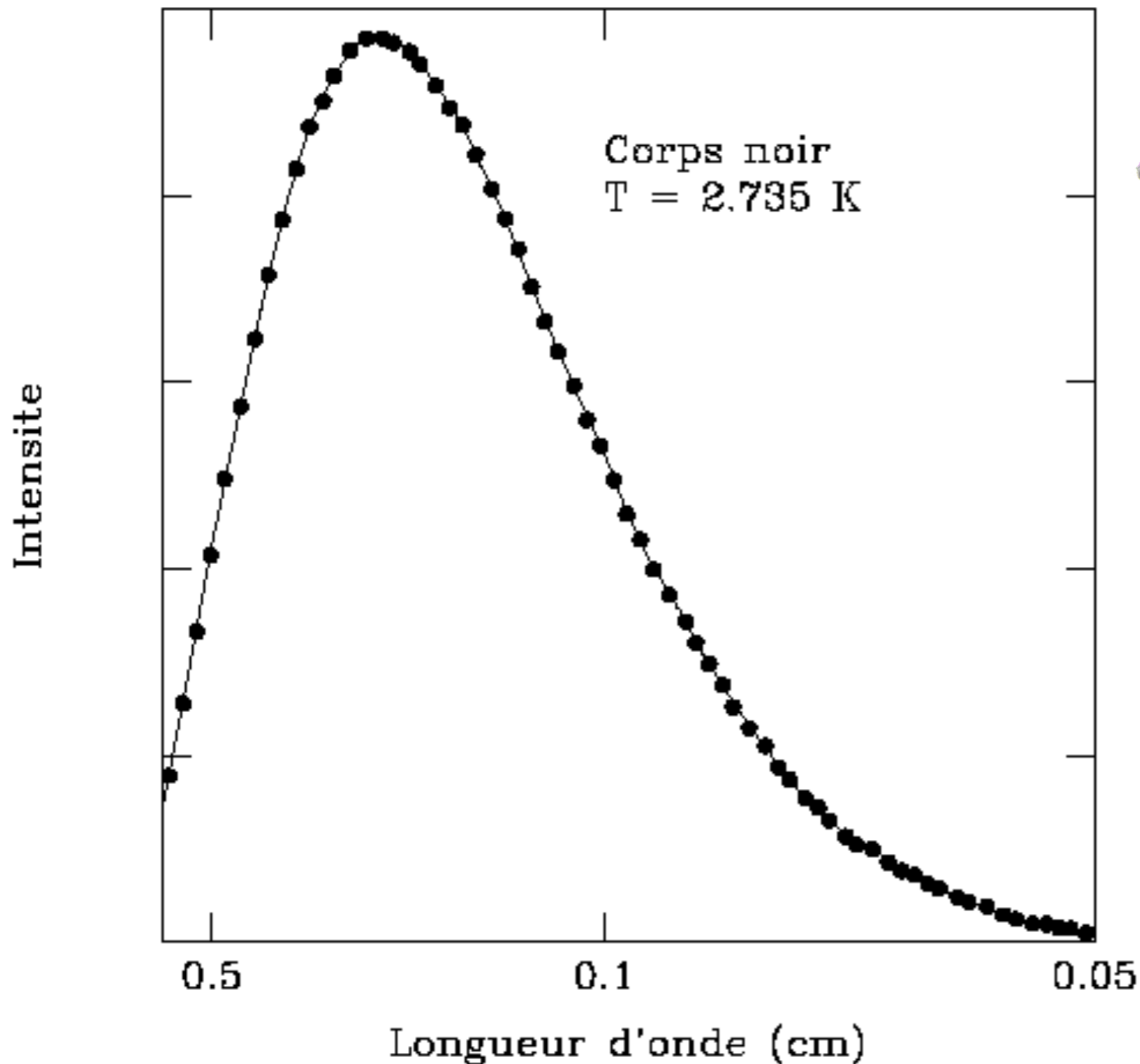
The New York Times  
Published: May 21, 1965  
Copyright © The New York Times



## A la suite de Penzias & Wilson

# COBE : la mesure du spectre d'émission et des anisotropies du rayonnement fossile

George F. Smoot: Nobel Lecture > <https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.79.1349>



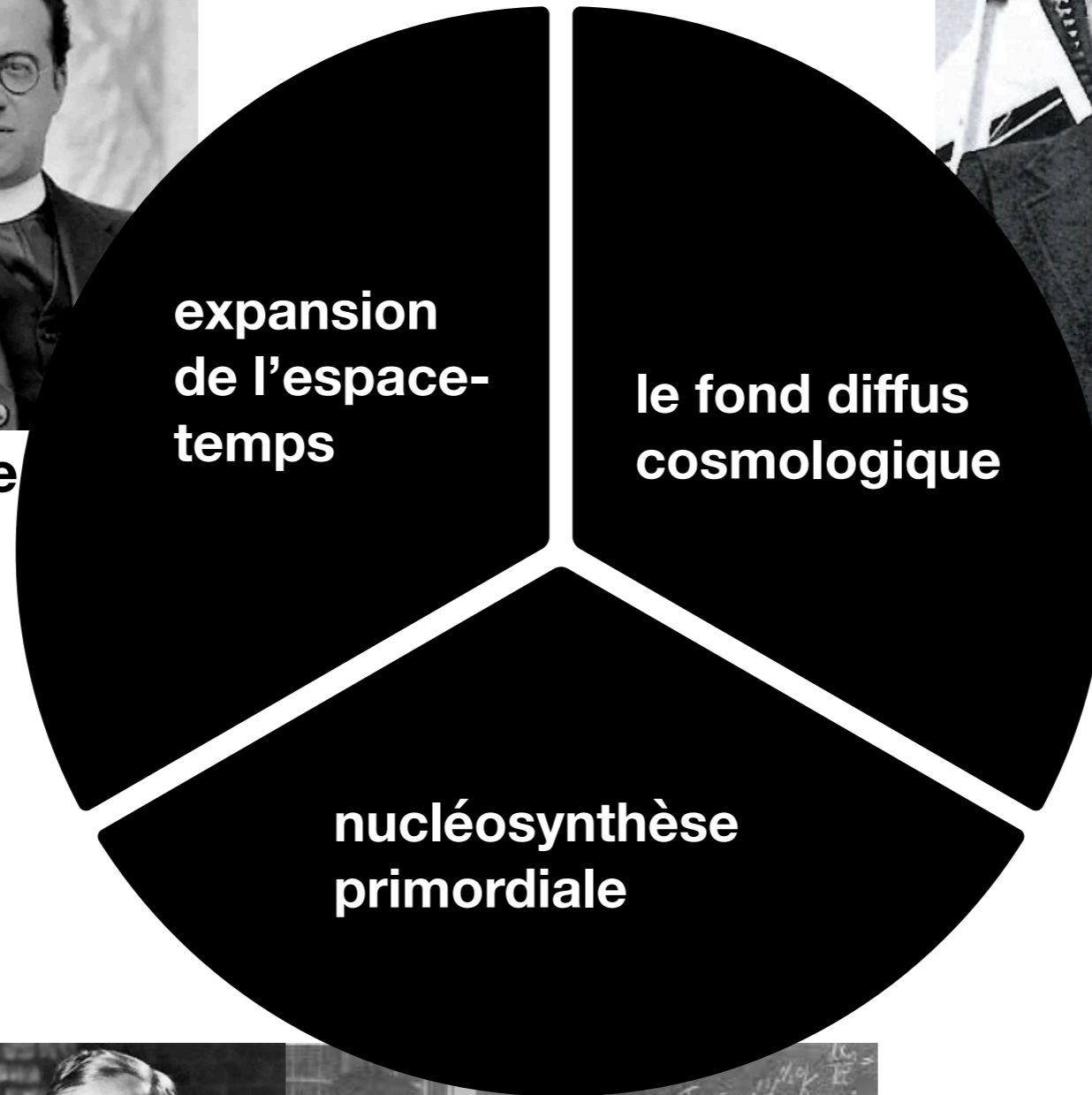
George F. Smoot and John C. Mather  
prix Nobel 2006 *“for their discovery  
of the blackbody form and anisotropy  
of the cosmic microwave background  
radiation”*.



# la théorie du Big Bang



Loi de Hubble-Lemaître



Penzias et Wilson



Gamow, Alpher, Hermann



2

3

4

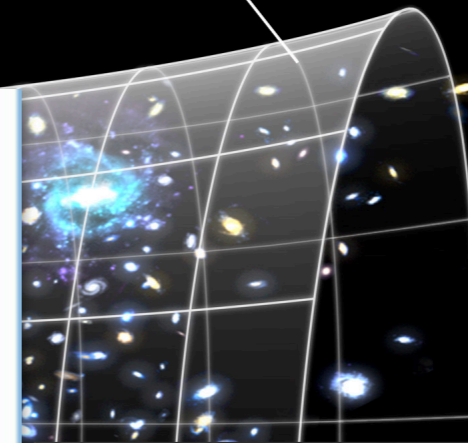
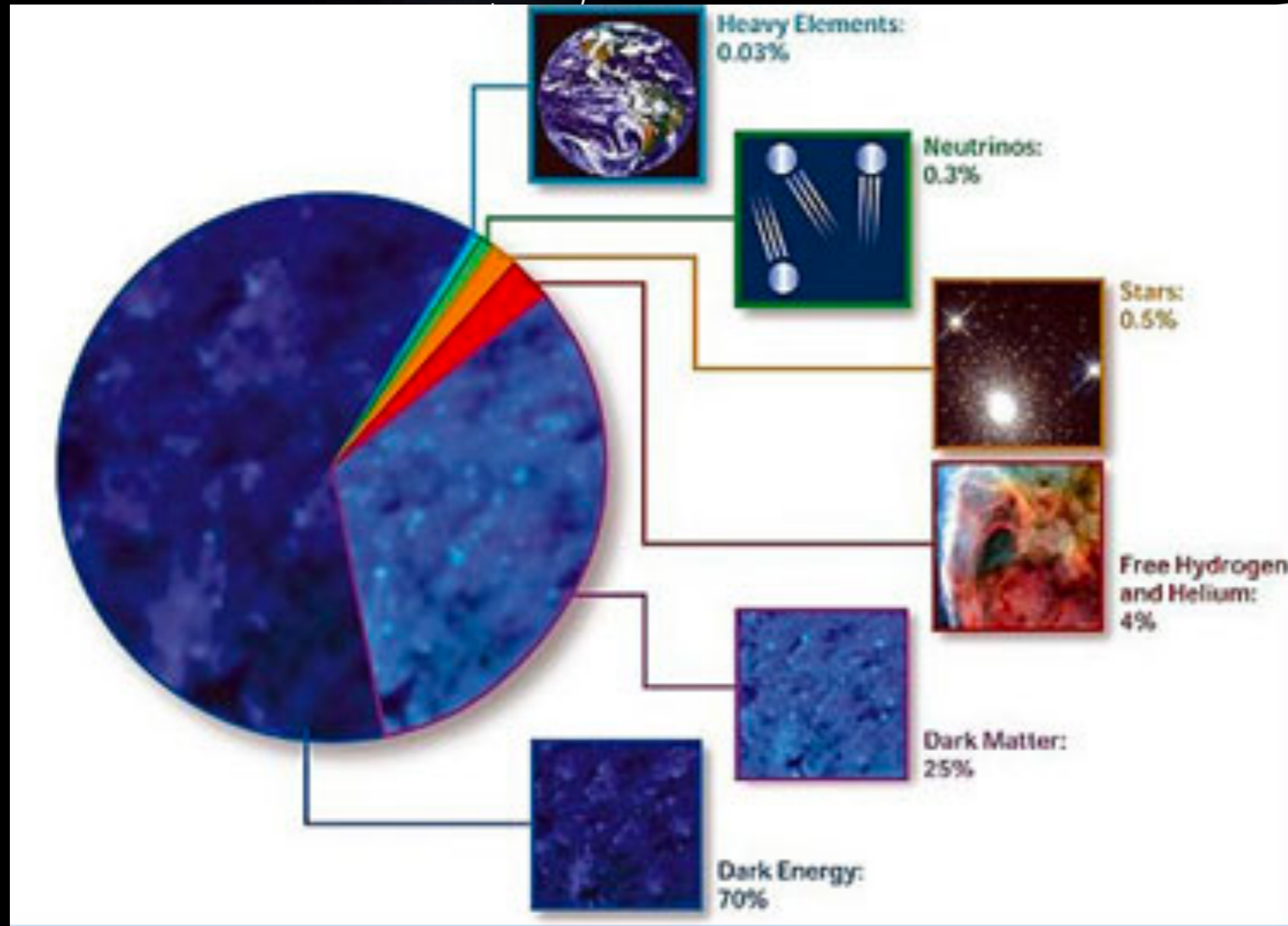
5

Afterglow Light Pattern  
375,000 yrs.

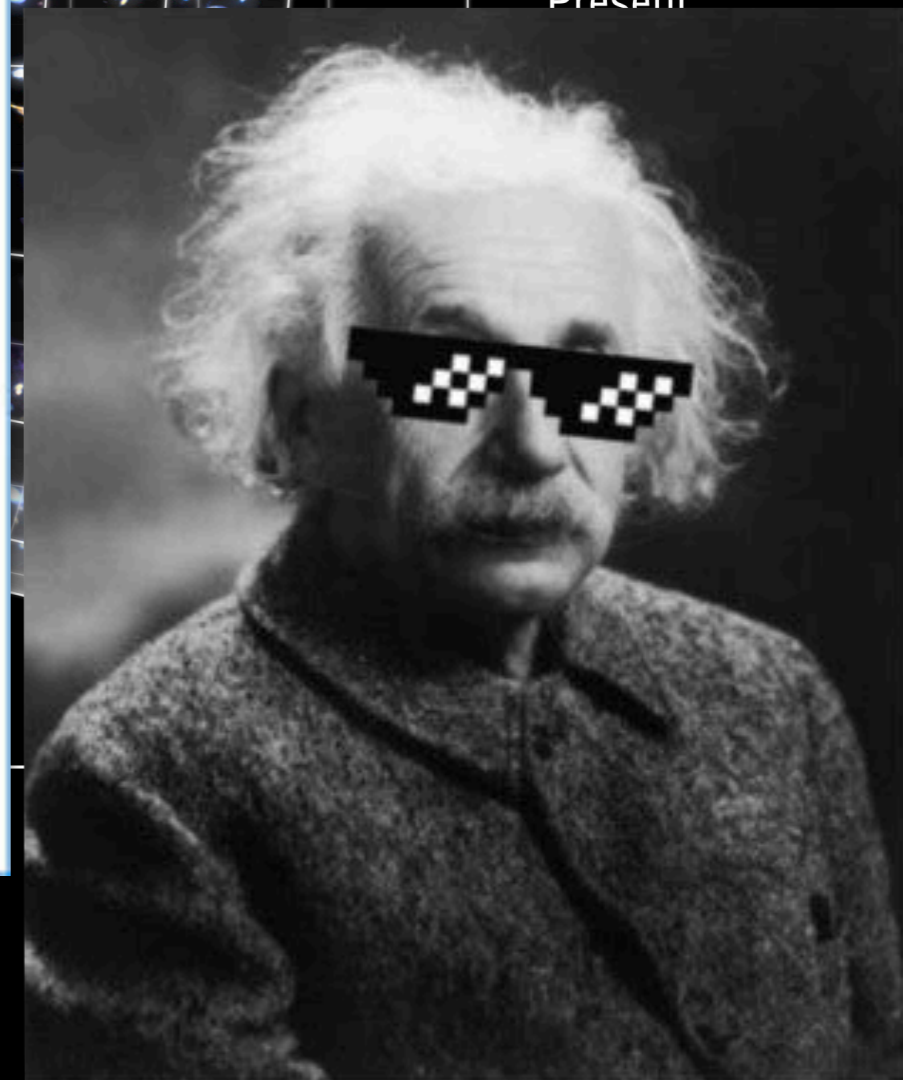
Dark Ages

Development of  
Galaxies, Planets, etc.

Dark Energy  
Accelerated Expansion



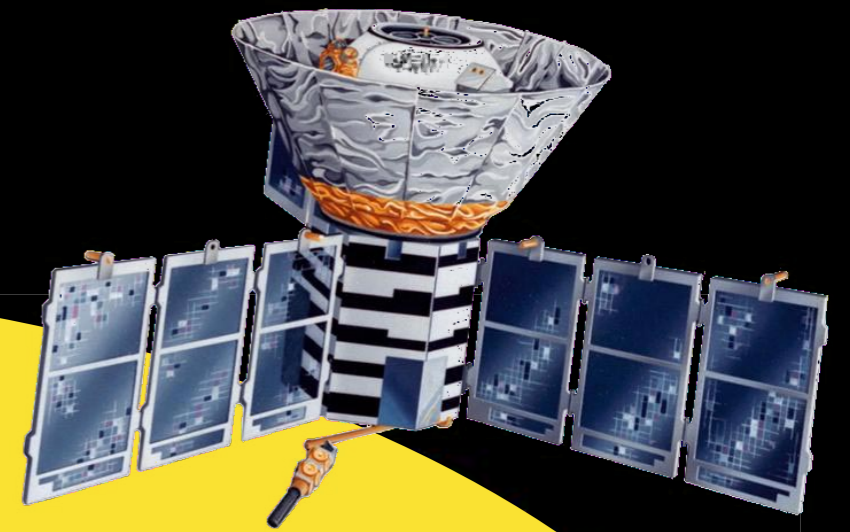
Present



**seulement 6 paramètres libres dans le modèle !**

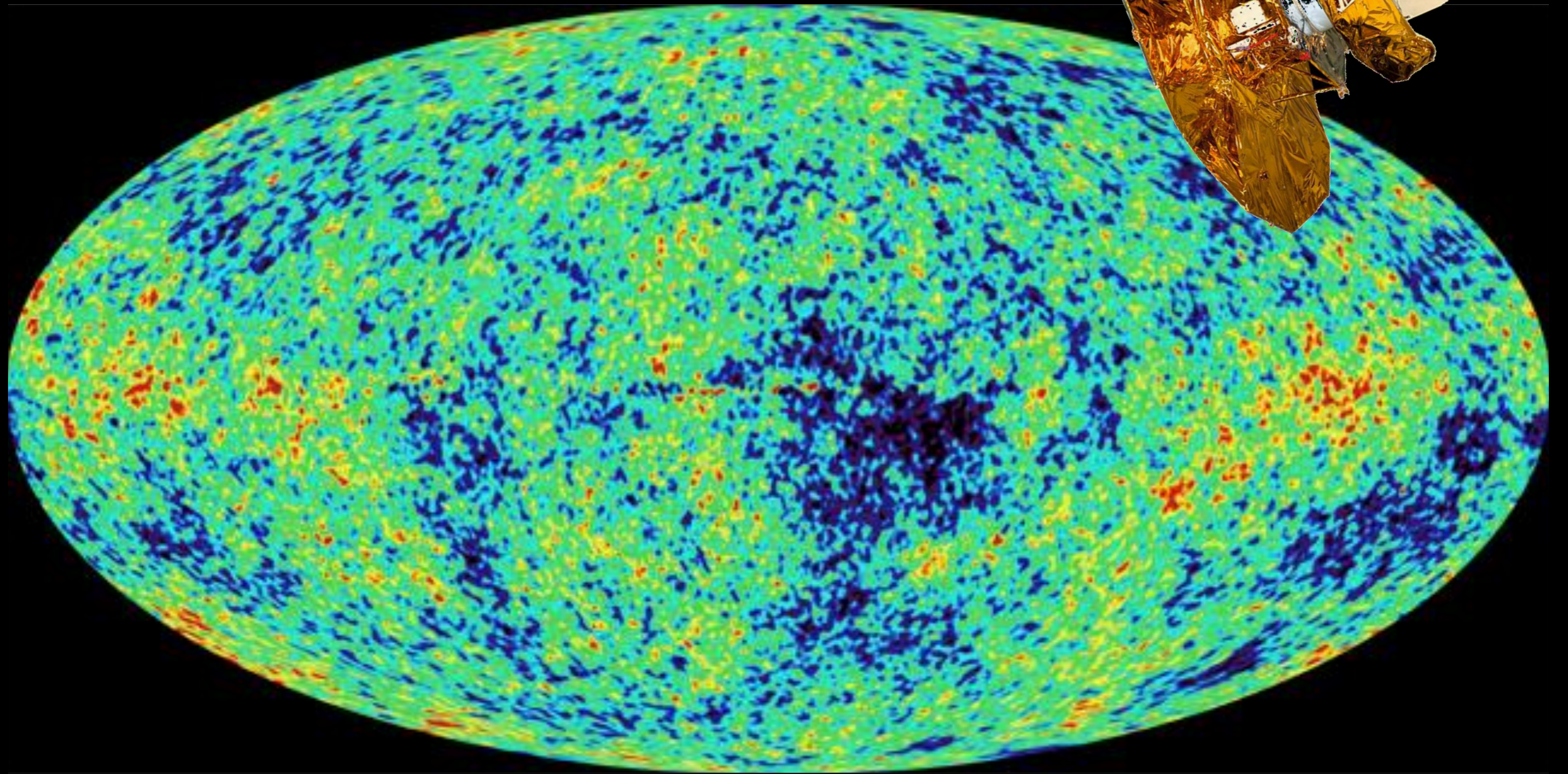
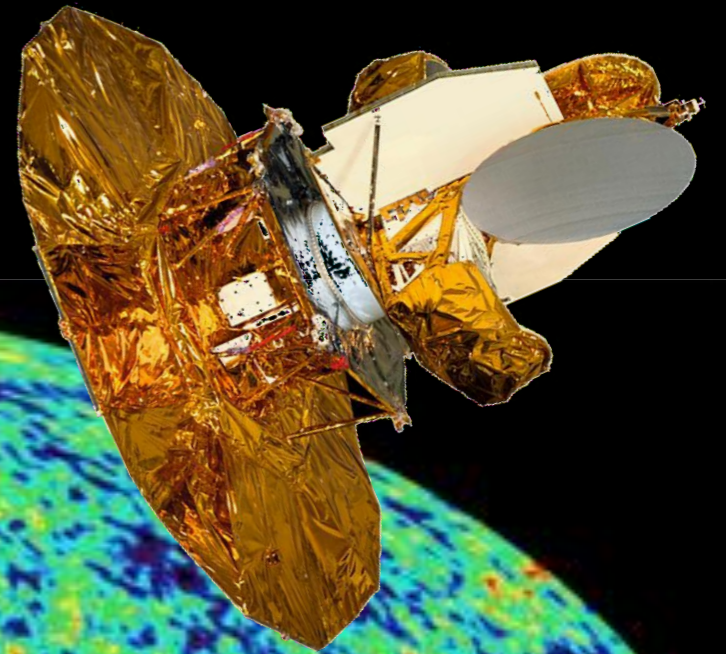


# COBE, 1992



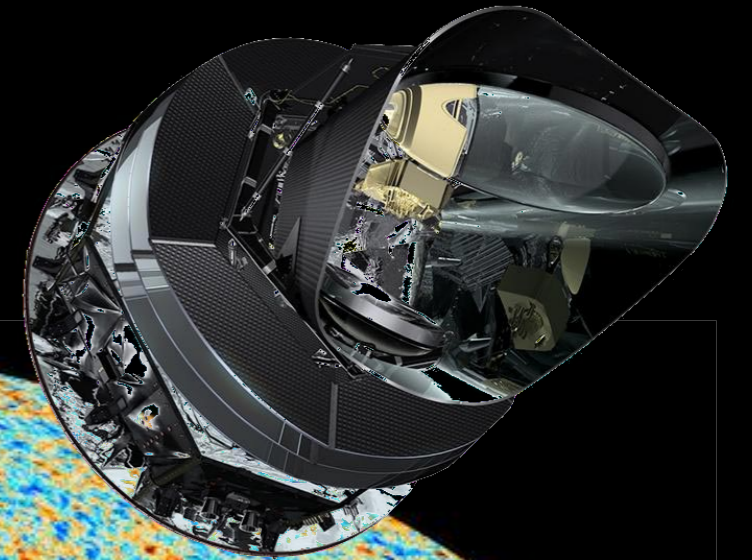


# WMAP, 2003

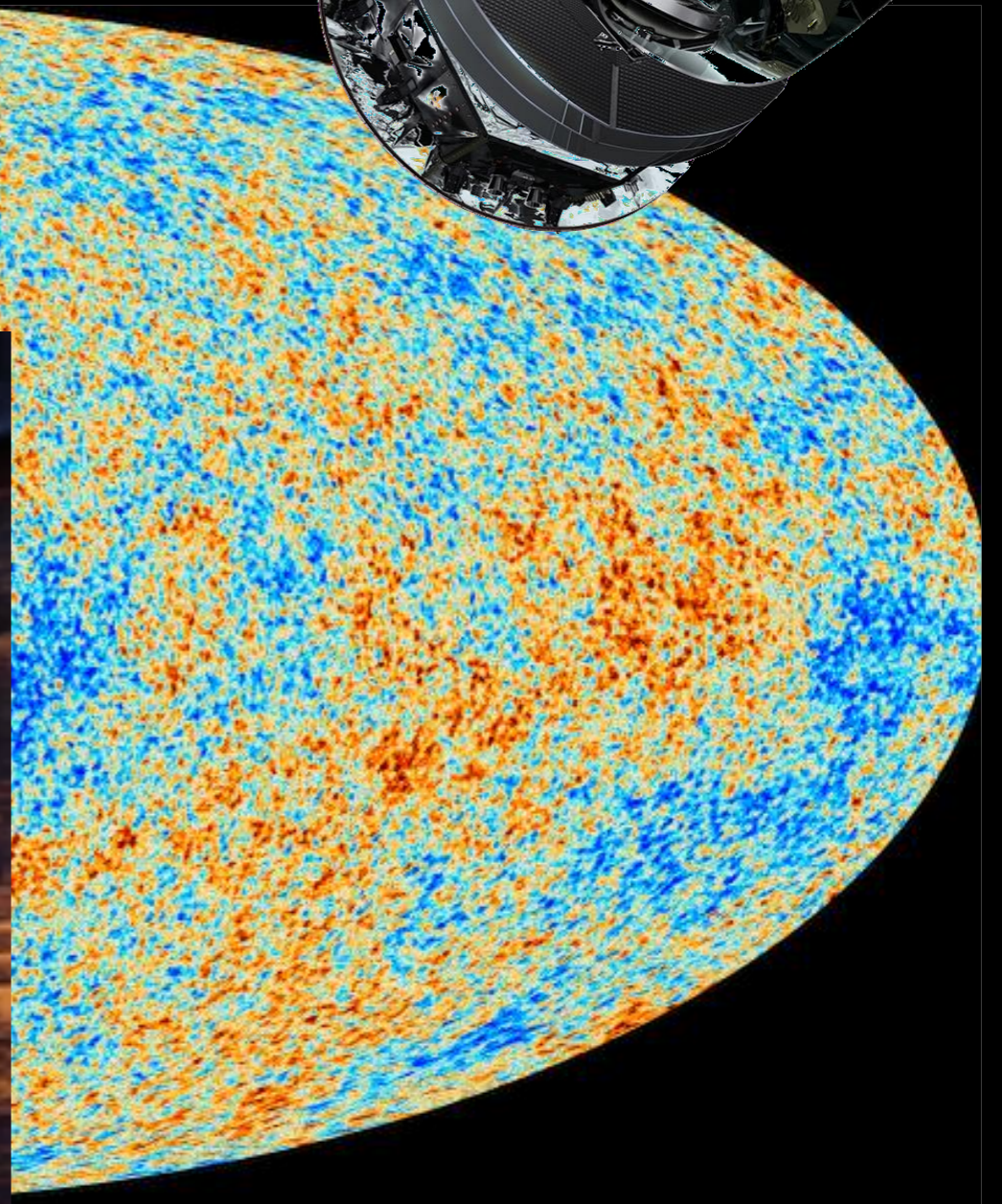




# Planck, 2018

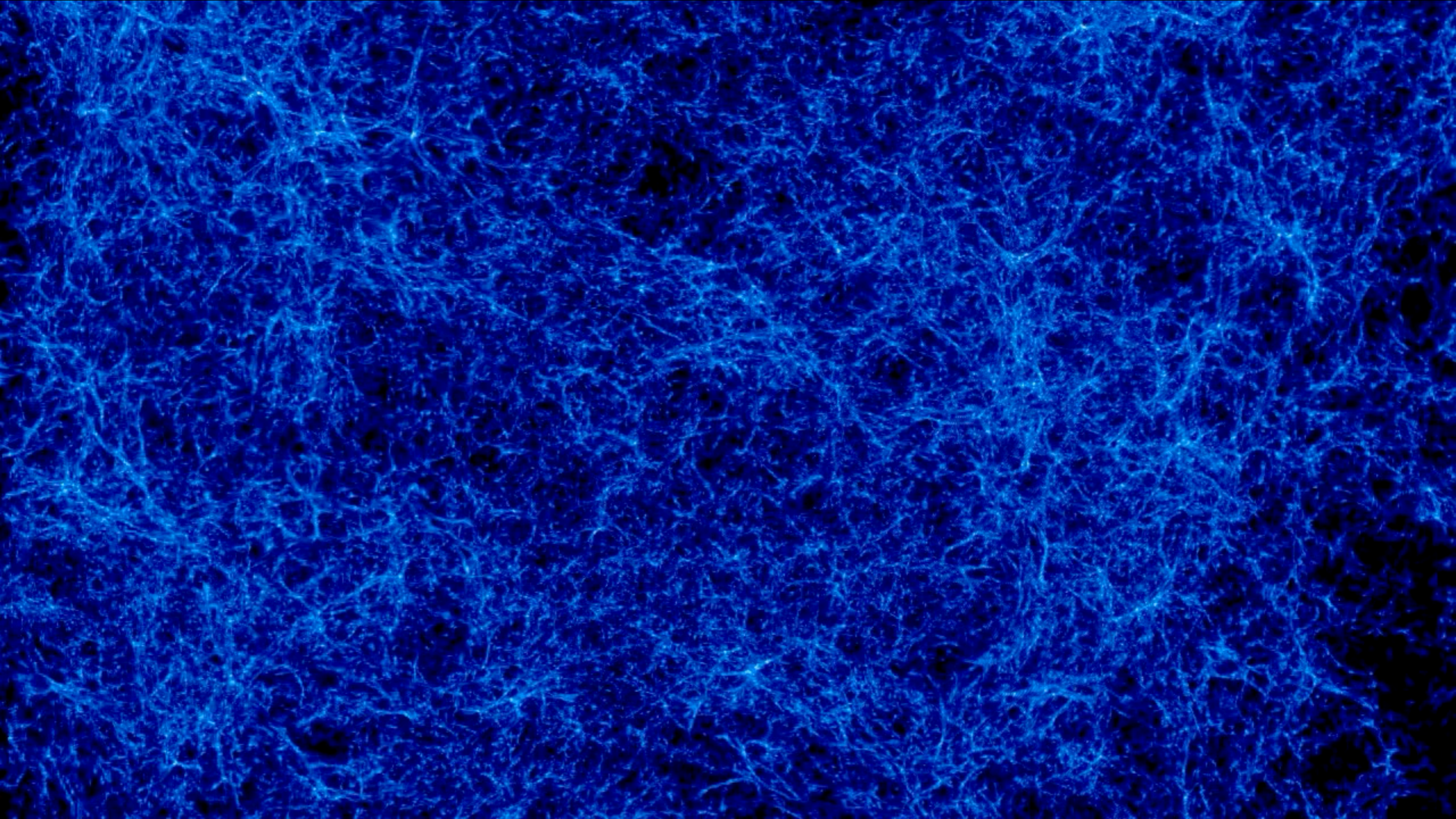


soupe primordiale très homogène mais avec quelques grumeaux





le grandes structures de l'Univers se forment à partir des grumeaux primordiaux

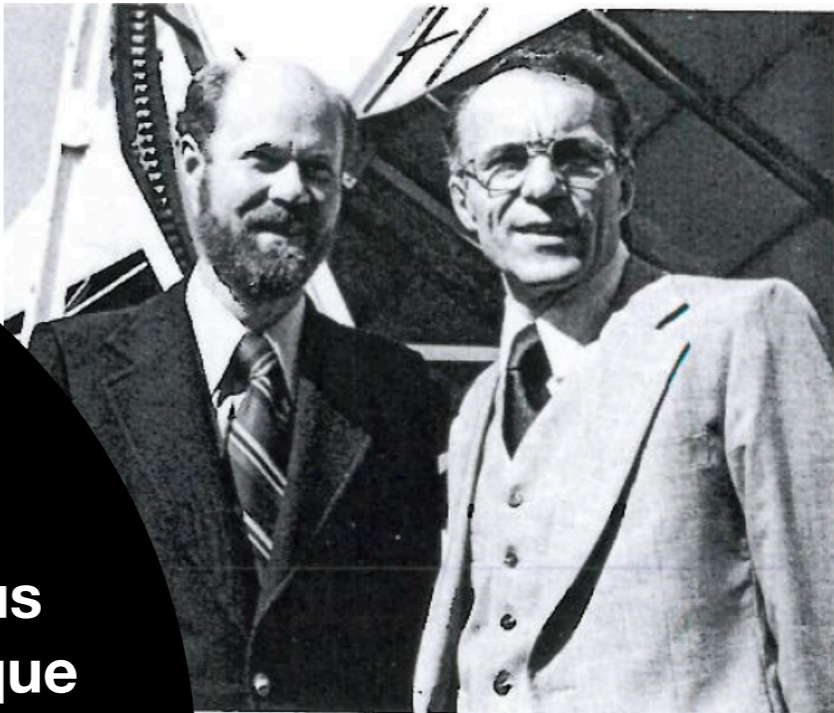
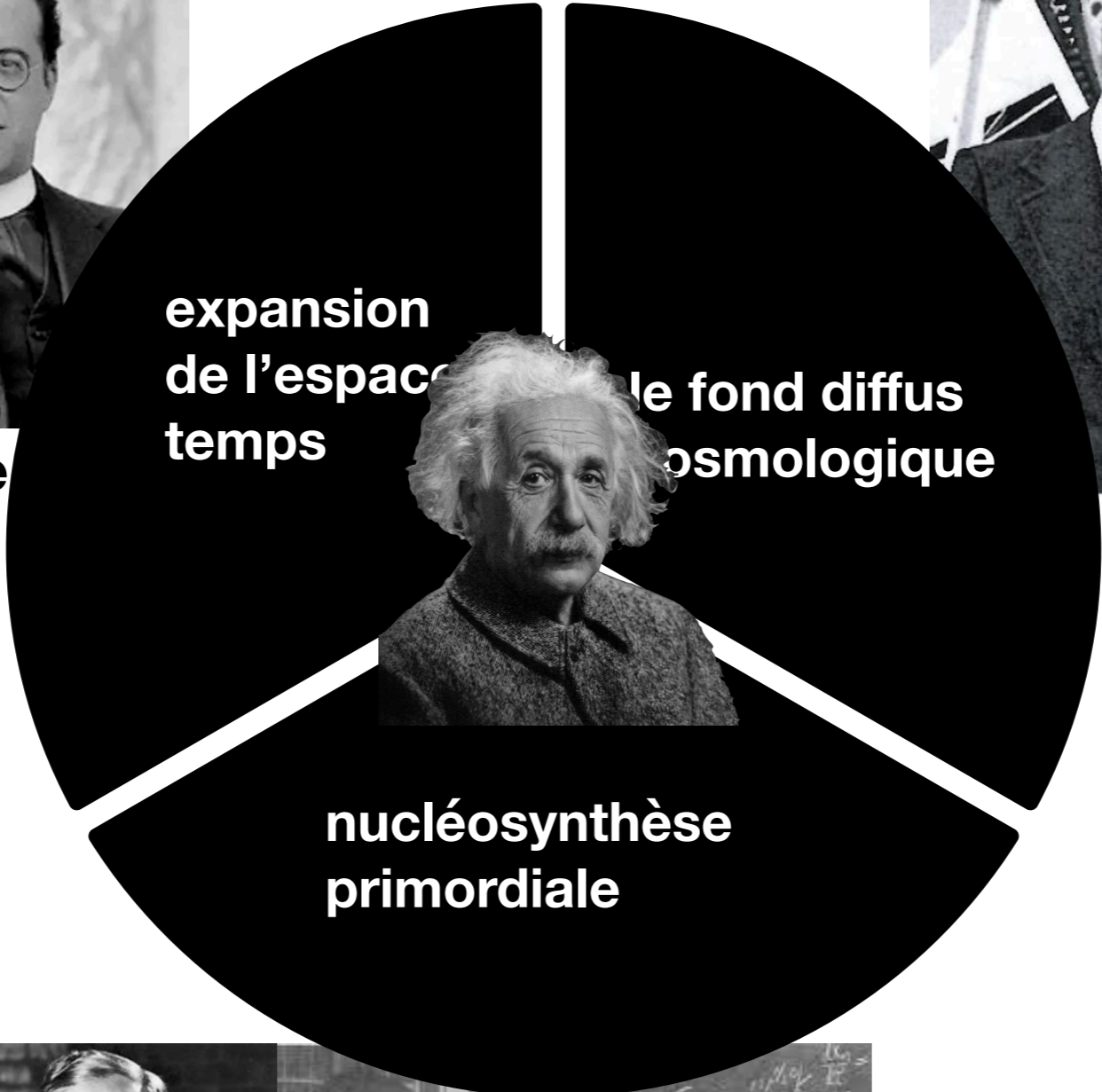




# la théorie du Big Bang = succès pour expliquer la genèse de l'Univers



Loi de Hubble-Lemaître



Penzias et Wilson



Gamow, Alpher, Hermann



The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex network of blue and orange filaments against a dark blue background. In the foreground, there are two large, semi-transparent blue spheres, one on the left and one on the right. Below these spheres, there are several blue liquid splashes, suggesting a connection between the CMB fluctuations and the formation of matter.

**sommes-nous issus des fluctuations  
quantiques du vide primitif ?**



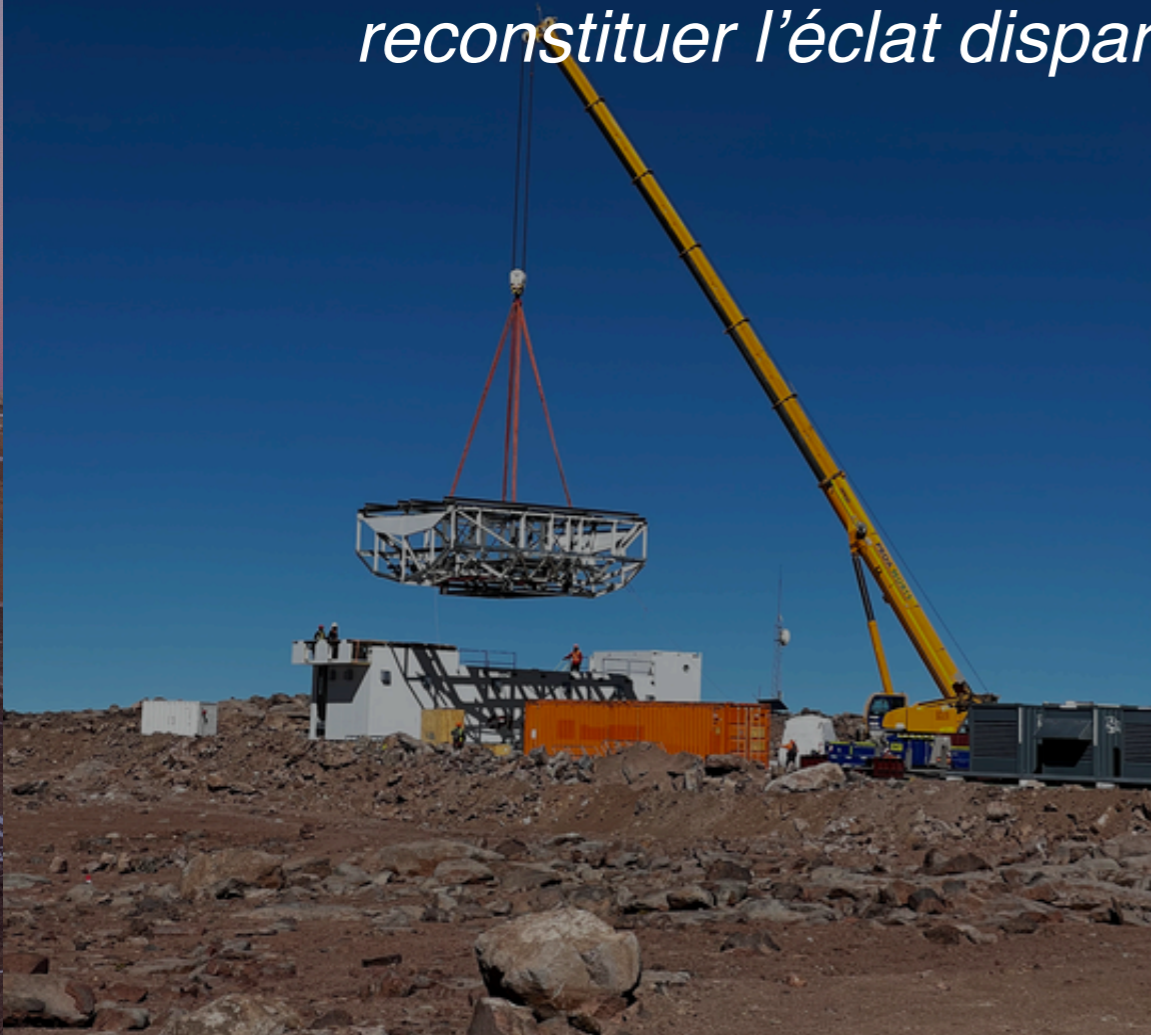
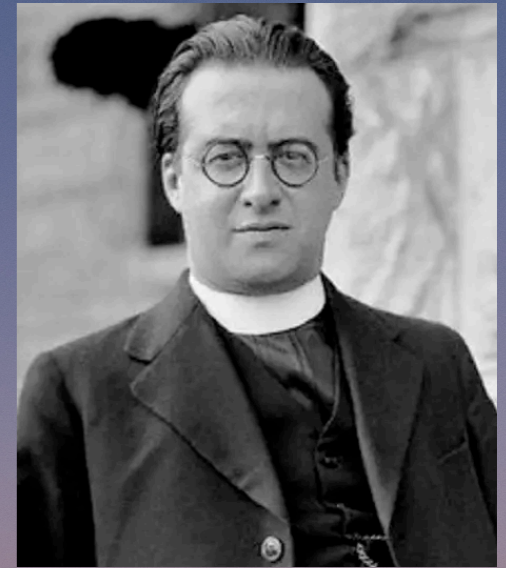


POLARBEAR / ACT / Simons Array / CLASS / Simons Observatory





Georges Lemaître note en 1931 :  
*“L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarbille mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes.”*



POLARBEAR / ACT / Simons Array / CLASS / Simons Observatory









"La nuit n'est nuit que pour nous. Ce sont nos yeux qui sont obscurs."  
— René Barjavel, *La nuit des temps*





