

Rencontres de l'infiniment grand à l'infiniment petit 2023

Observer l'infiniment grand ou pourquoi la nuit n'est (peut-être) pas noire



European Research Council
Established by the European Commission



Josquin Errard (APC / CNRS)

josquin@apc.in2p3.fr

19 juillet 2023

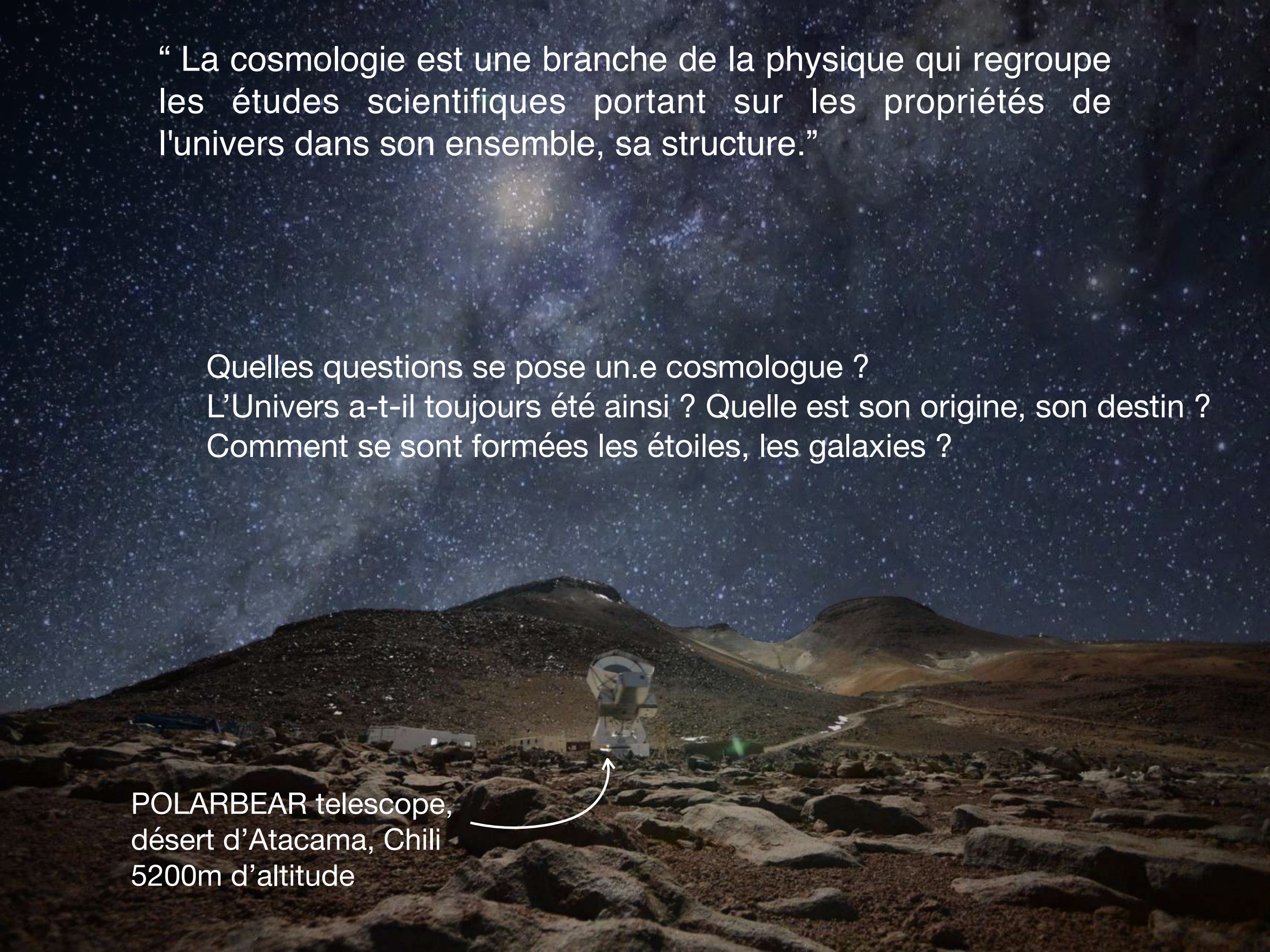
“La cosmologie est une branche de la physique qui regroupe les études scientifiques portant sur les propriétés de l'univers dans son ensemble, sa structure.”



“ 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 ?

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



Introduction : Univers local, galaxies et nuit noire

- 1- la relativité Galiléenne, la relativité restreinte et la relativité générale
- 2- le modèle du Big Bang
- 3- voyage vers l'instant "zero" et inflation cosmique
- 4- observer l'inflation cosmique ?

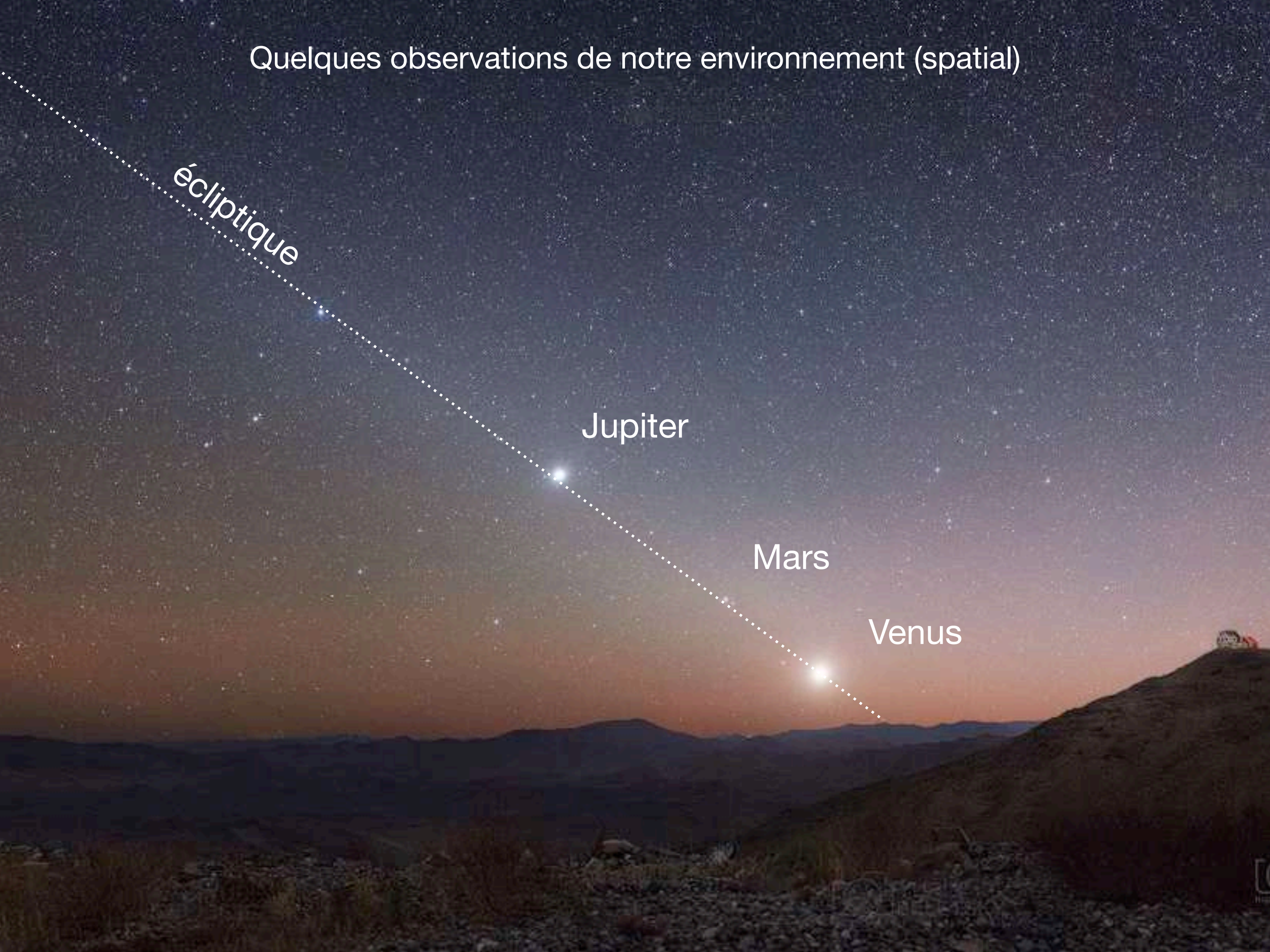
Quelques observations de notre environnement (spatial)

écliptique

Jupiter

Mars

Venus

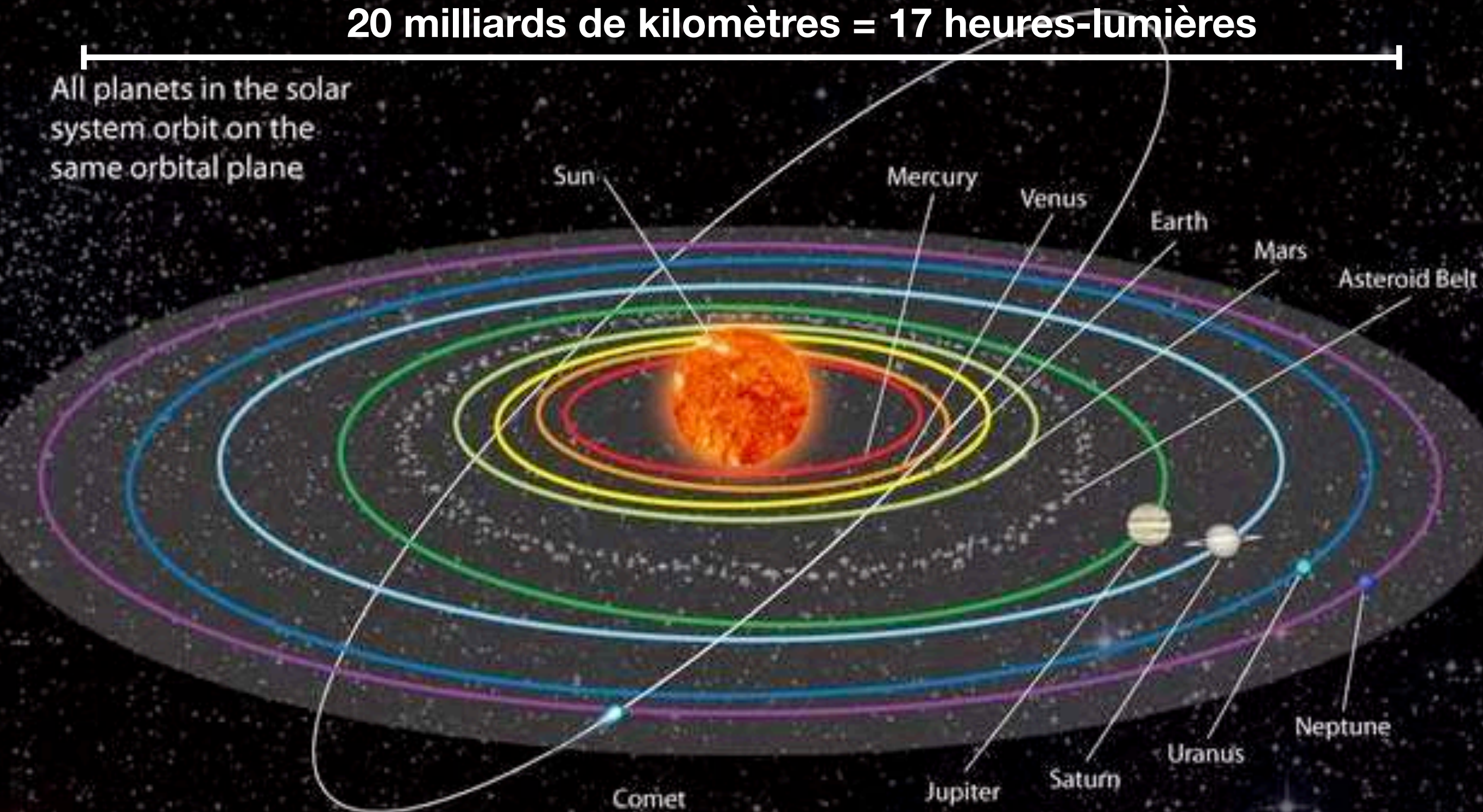


Orbital Plane

Quelques observations de notre environnement (spatial)

20 milliards de kilomètres = 17 heures-lumières

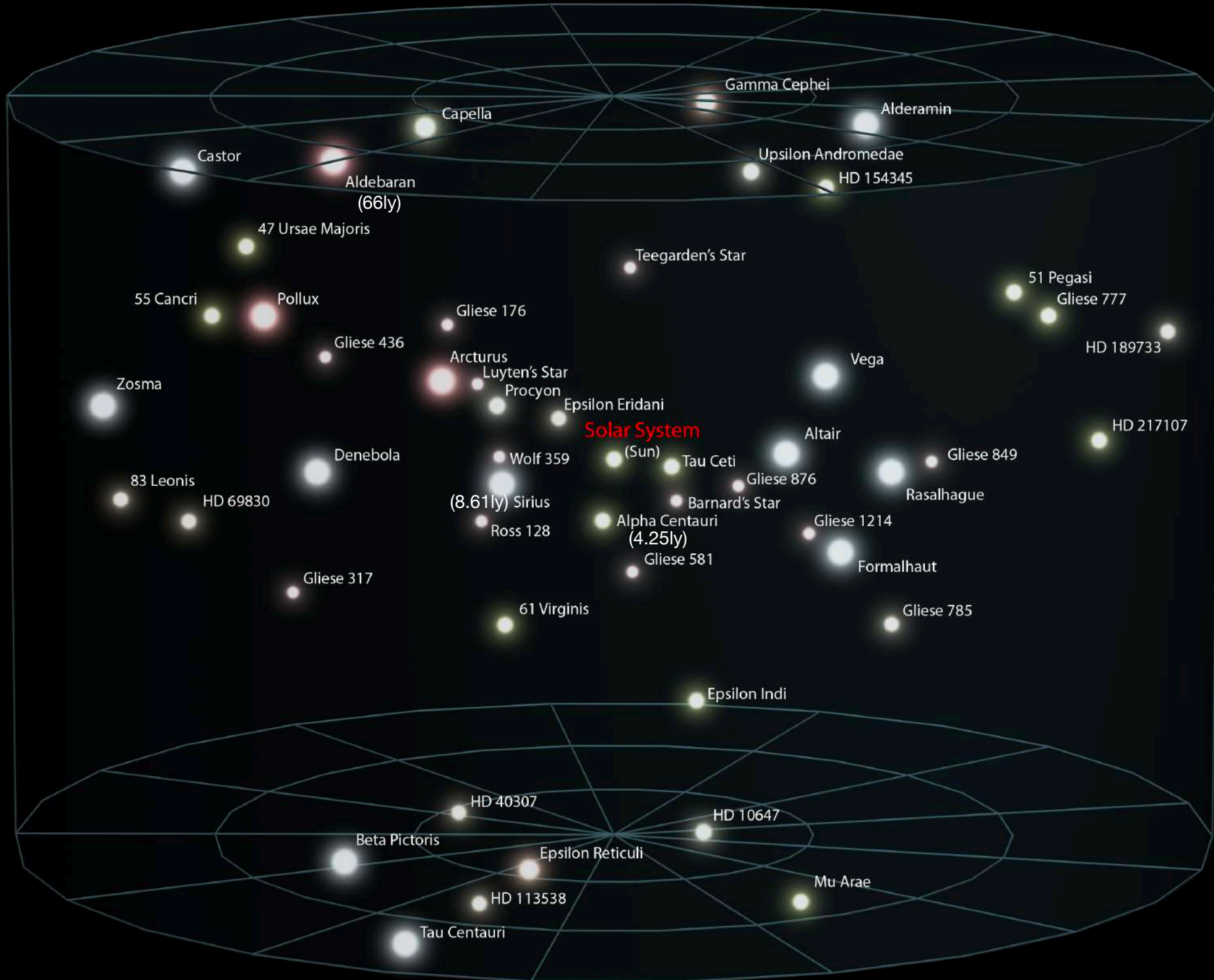
All planets in the solar system orbit on the same orbital plane



* 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)

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

Quelques observations de notre environnement (spatial)

natu



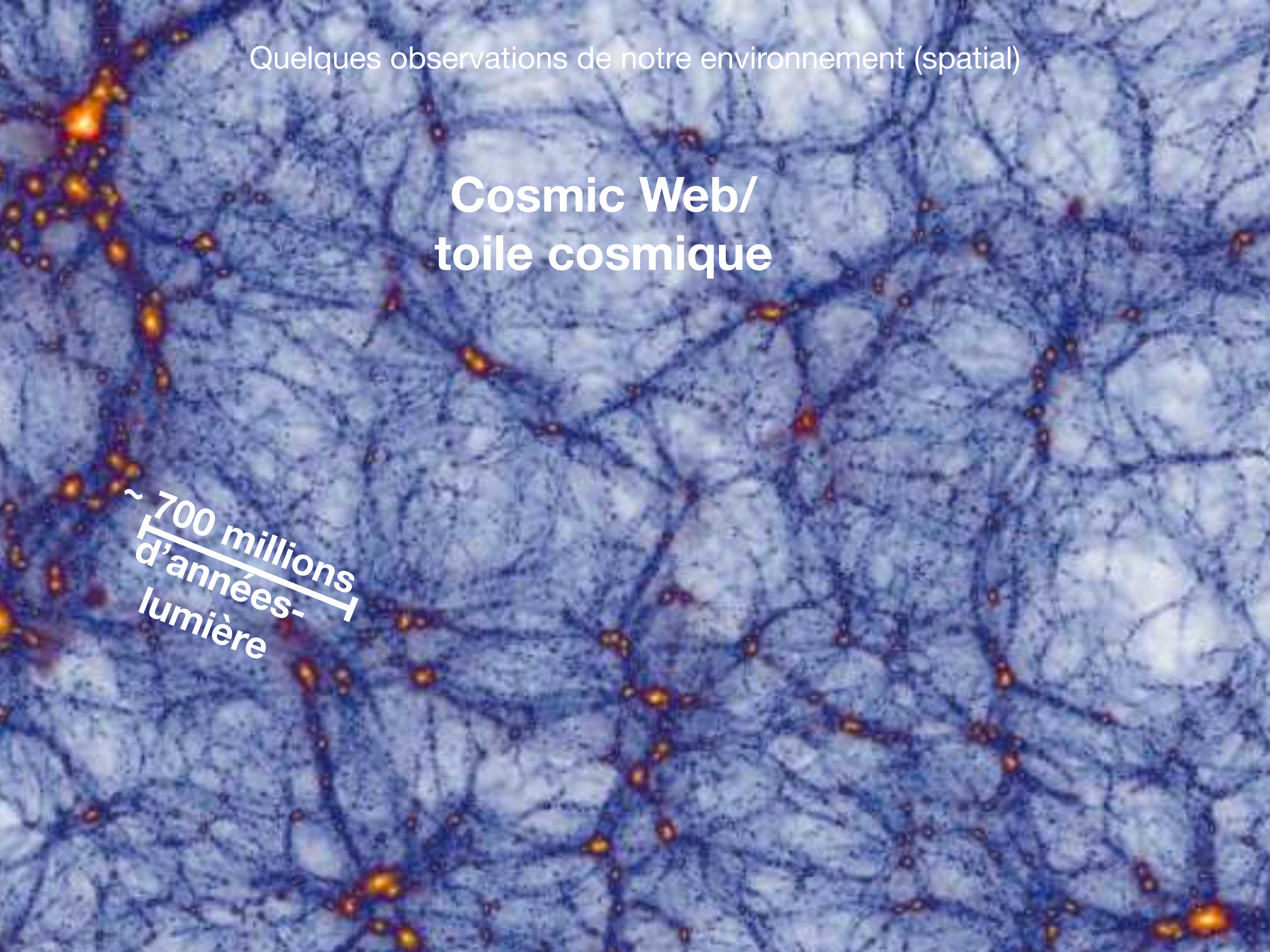
520 millions d'années-lumière
(4% du diamètre de l'Univers observable)

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

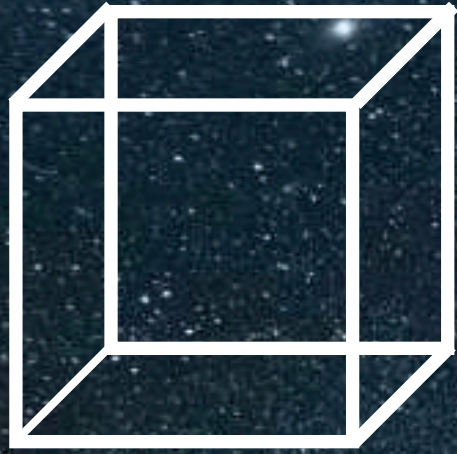




93 billion light years

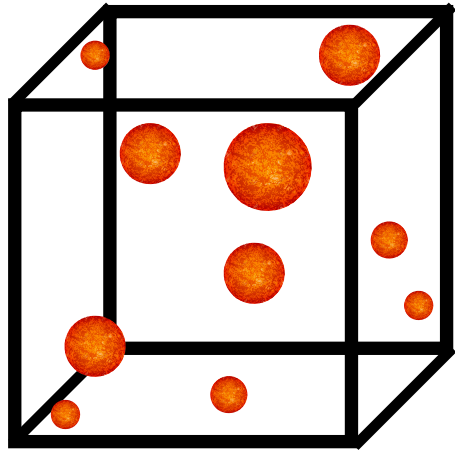
The known universe, Now





Pourquoi le ciel
nocturne est-il noir ?

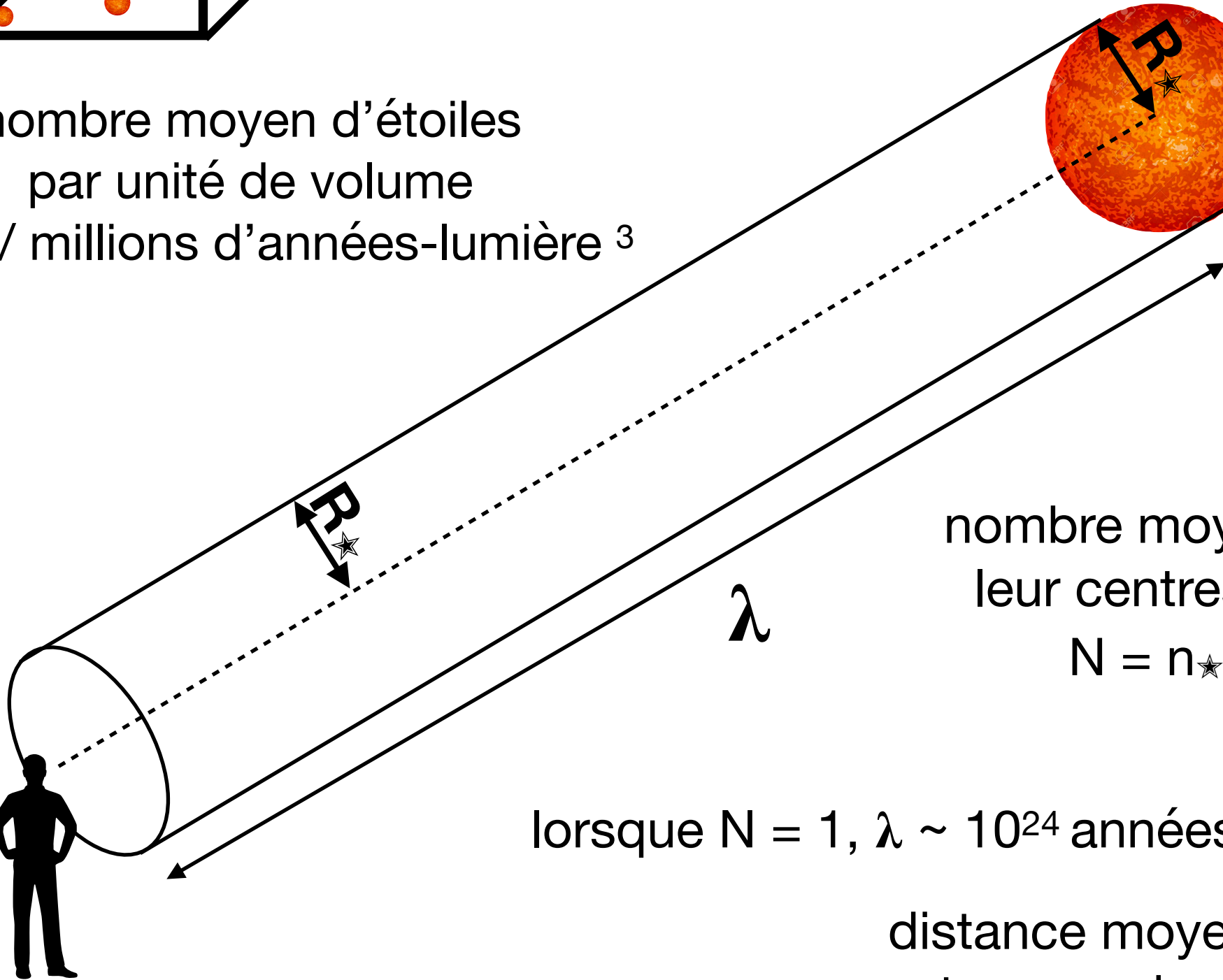
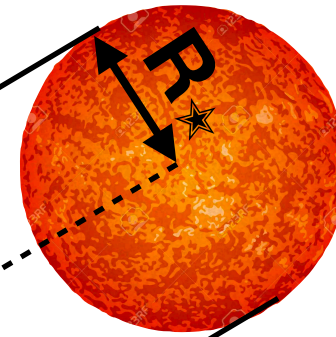
nombre moyen d'étoiles
par unité de volume
 $= 10^8 / \text{millions d'années-lumière}^3$



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

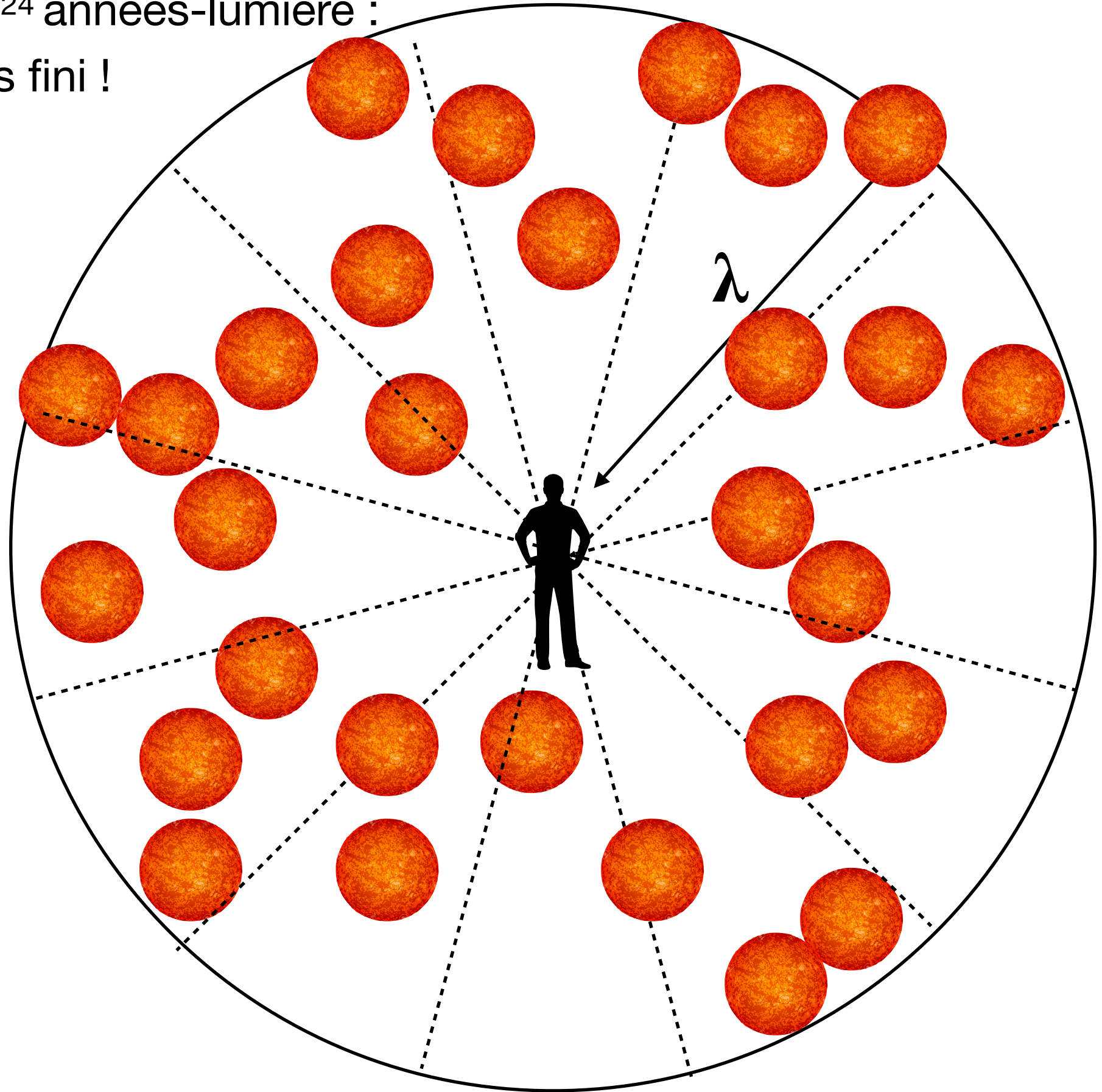
$$N = n_{\star} V = n_{\star} \lambda \pi R_{\star}^2$$

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

distance moyenne à laquelle
notre regard croise une étoile

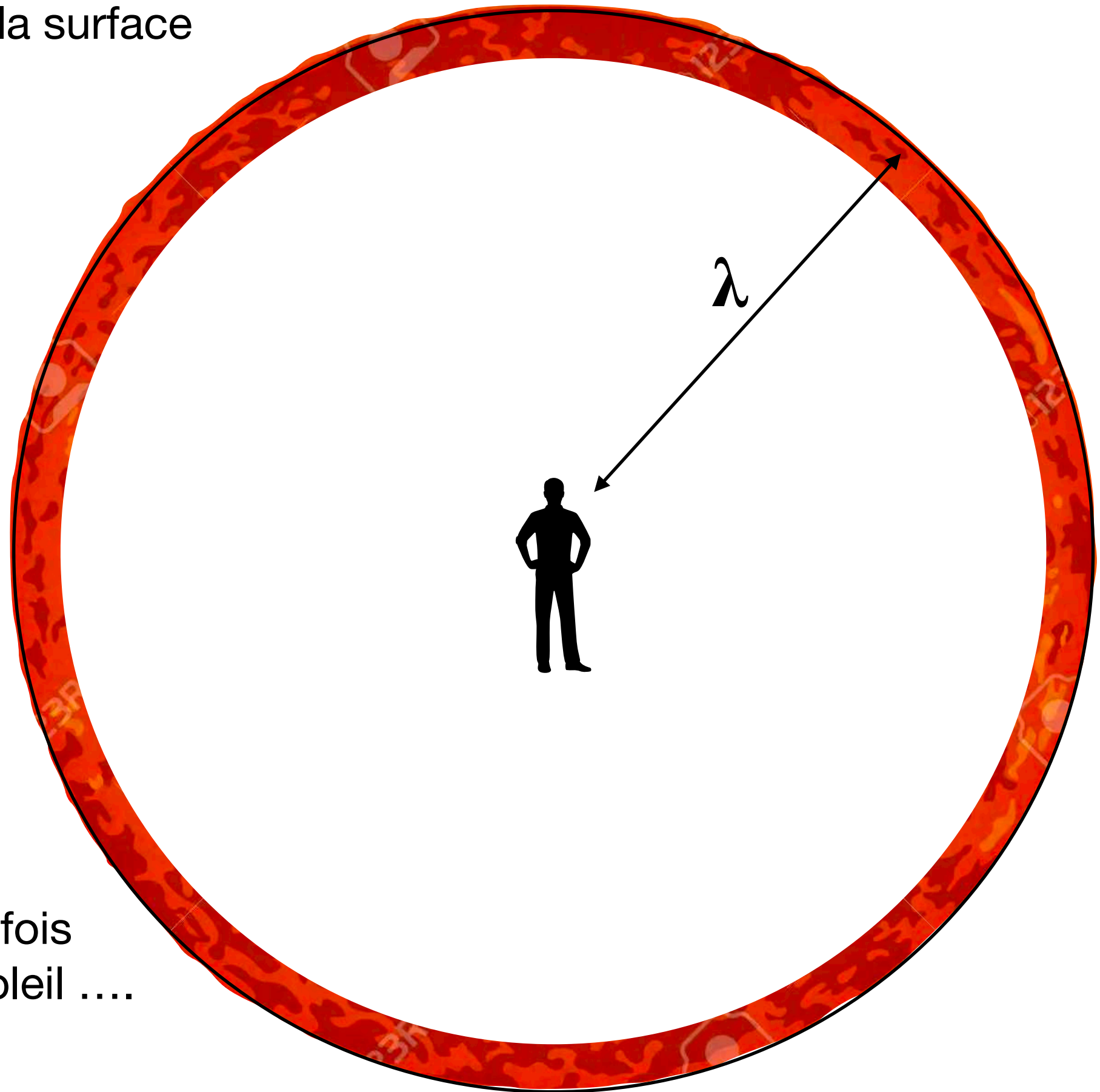
distance moyenne à laquelle notre regard
croise une étoile : $\lambda \sim 10^{24}$ années-lumière :
ce chiffre est grand, mais fini !

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





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



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

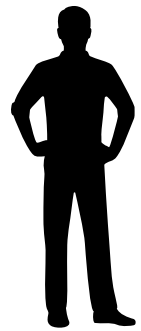
Solutions possibles du paradoxe

l'Univers n'est pas transparent

l'Univers n'est pas infiniment grand

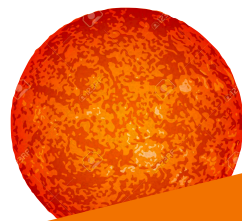
la luminosité des étoiles n'est pas constante

l'Univers n'est pas infiniment âgé



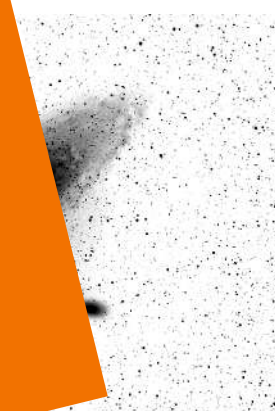
8,3 minutes-
lumière

Soleil



Proxima

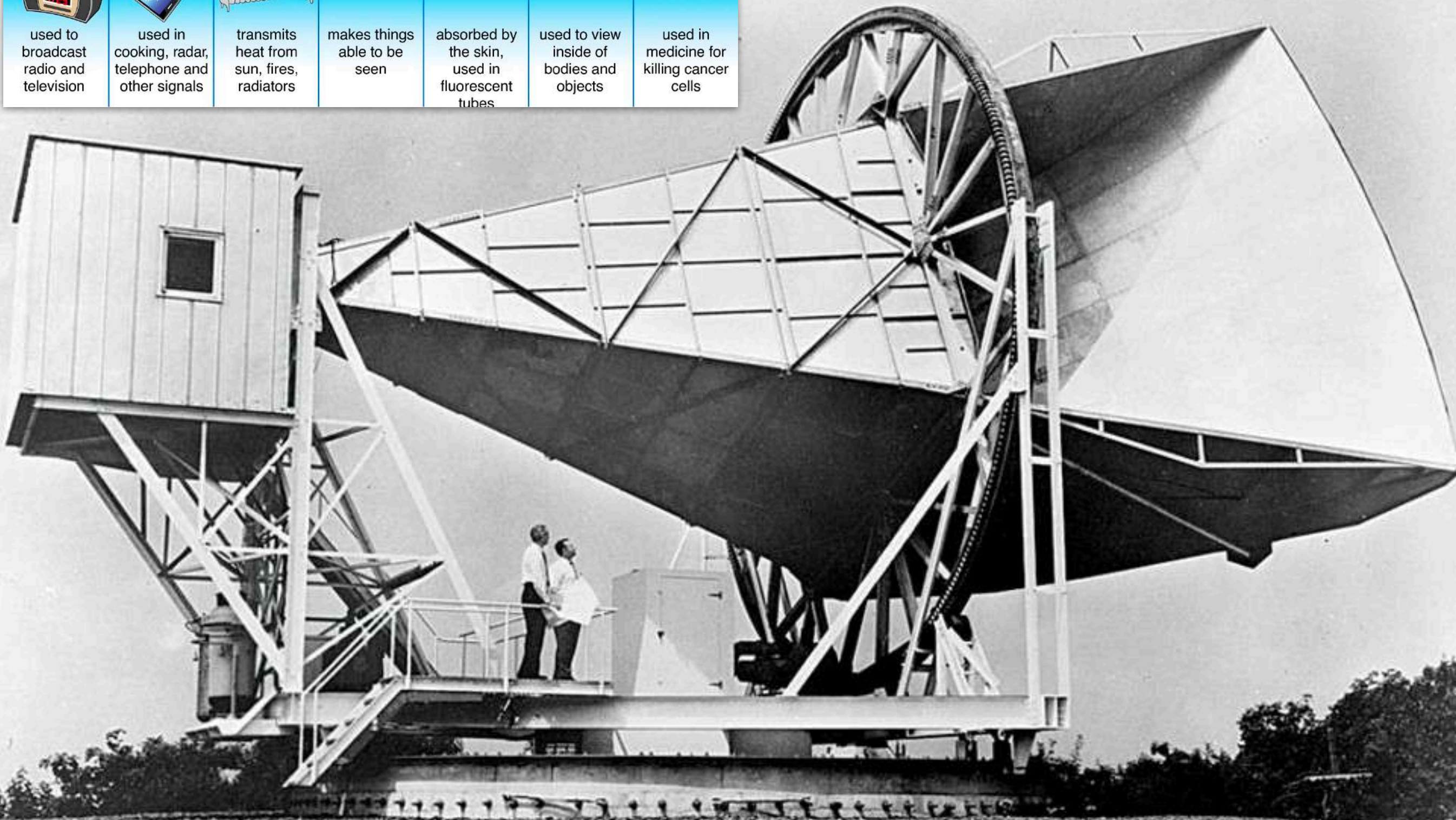
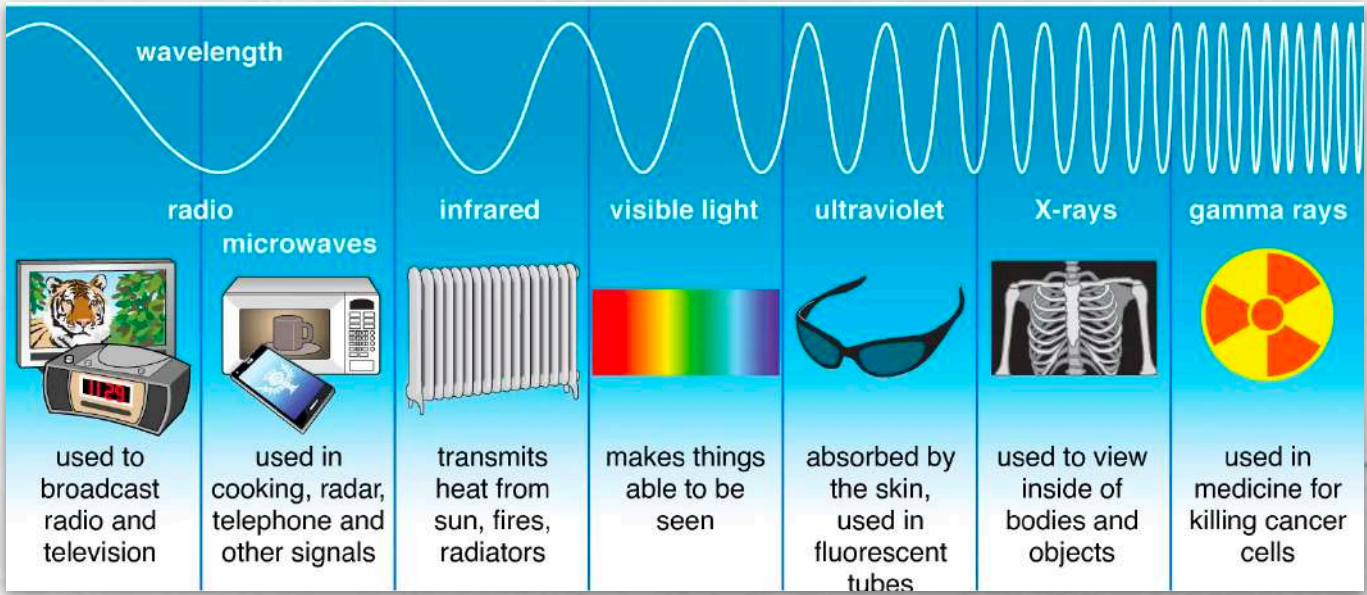
4,2 années



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

→ av
étern

[...] 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. »





1978

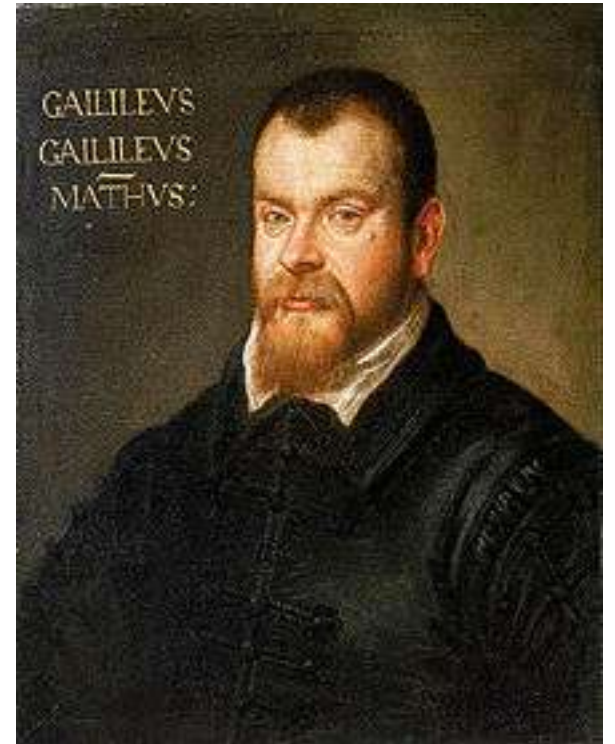


Pourquoi donner le
prix Nobel à deux
ingénieurs des Bell
laboratories?

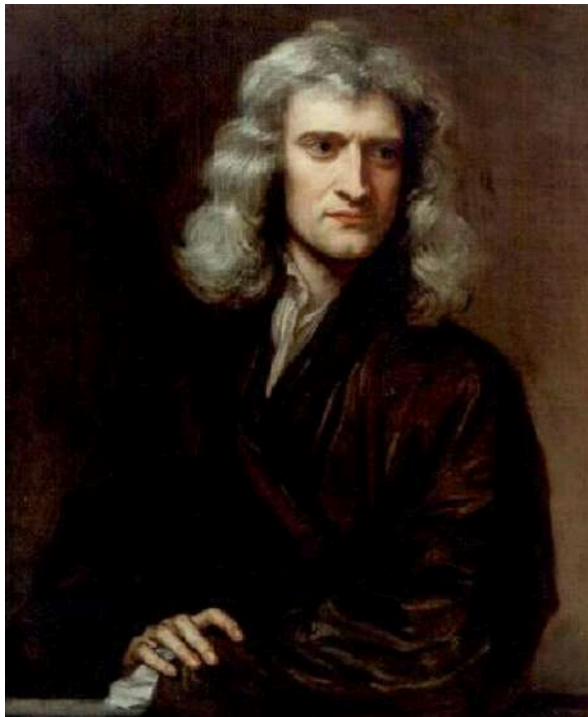
Premier chapitre de cette conférence : la relativité Galiléenne, la relativité restreinte et la relativité générale

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)

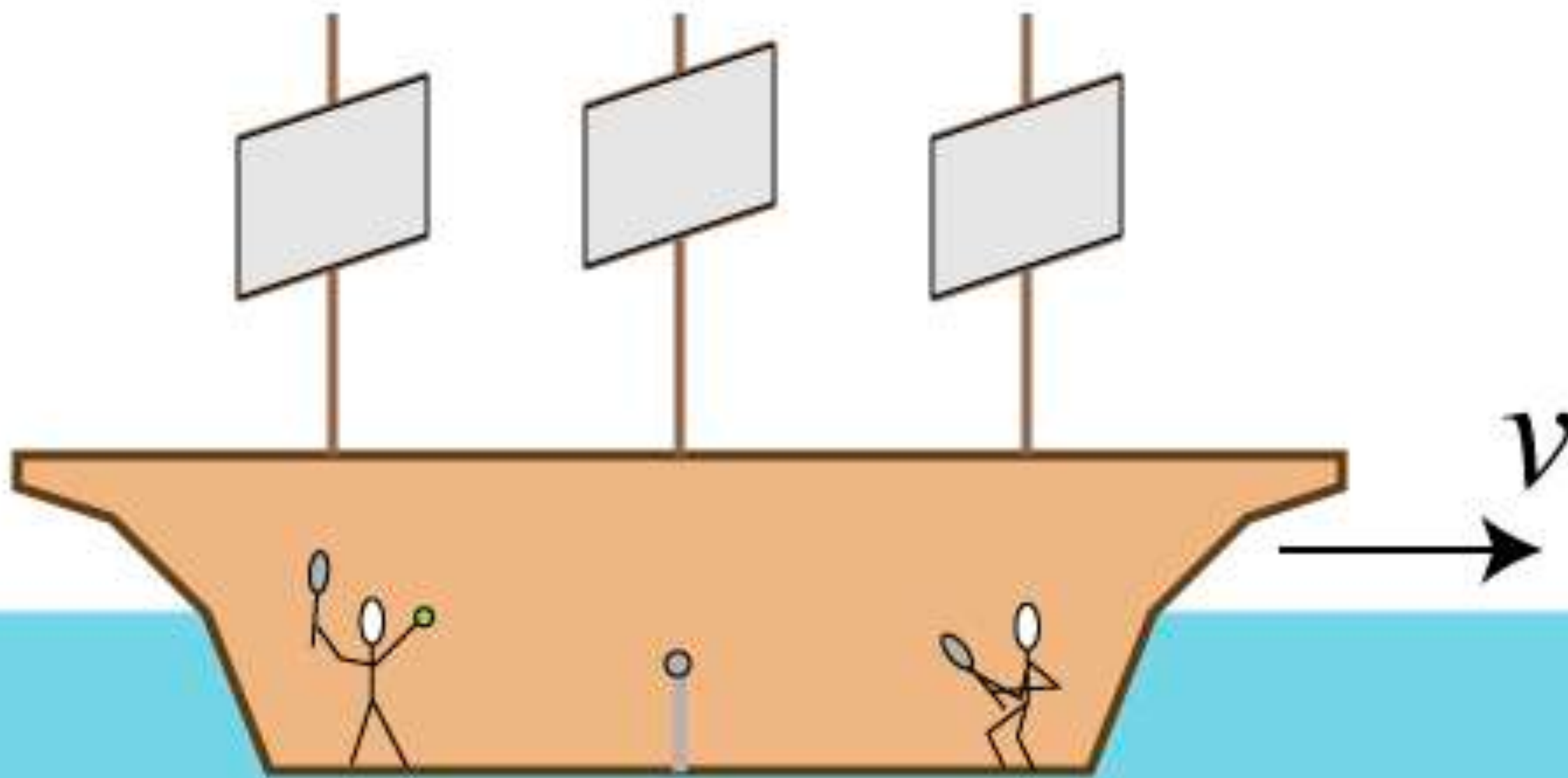


fondement pour les travaux
Newton, e.g. relation
fondamentale de la
dynamique



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:

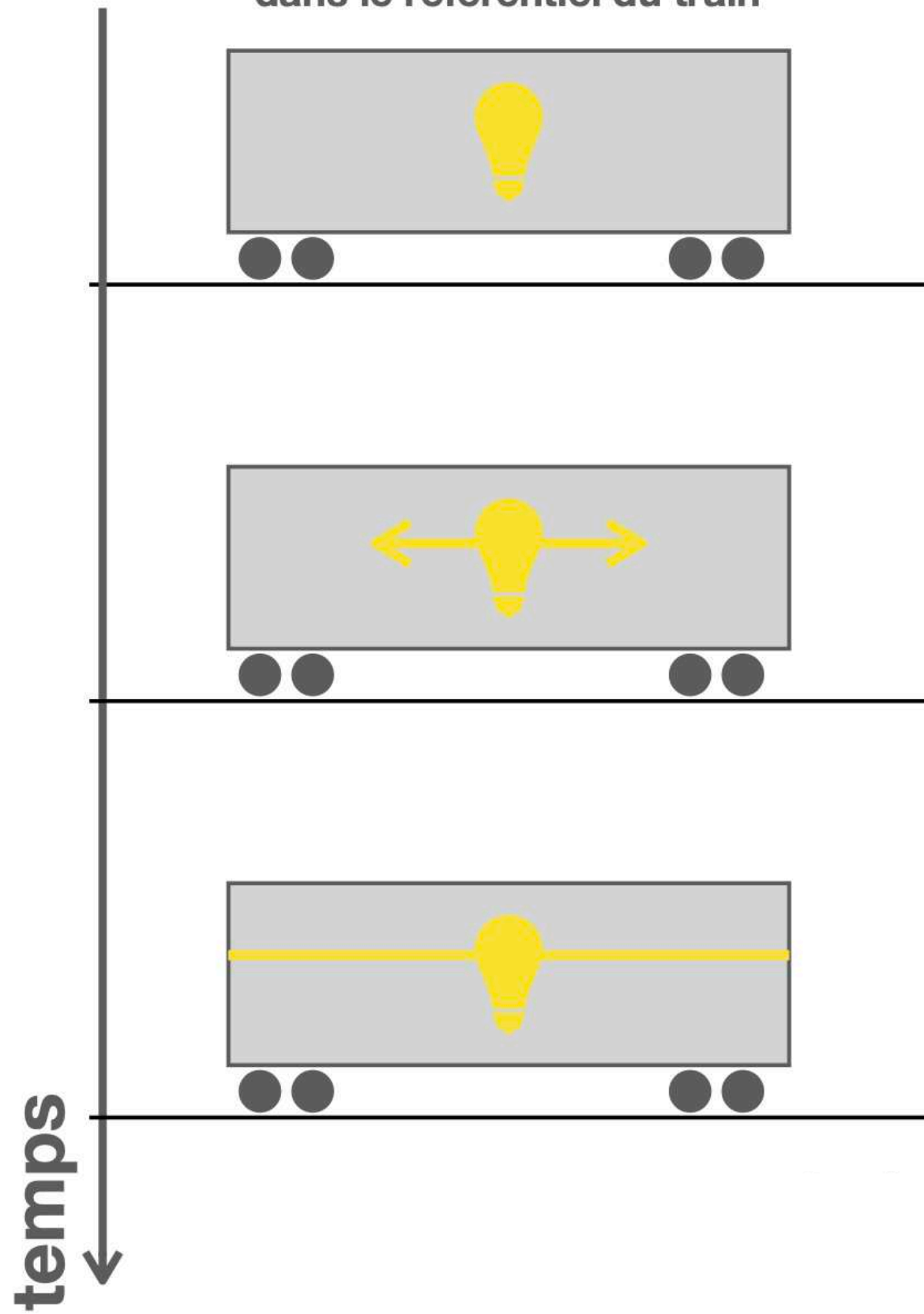
- Toutes les lois de la physique sont invariantes dans tous les référentiels d'inertie.
- La vitesse de la lumière dans le vide, c a la même valeur dans tous les référentiels d'inertie : c est une constante universelle.

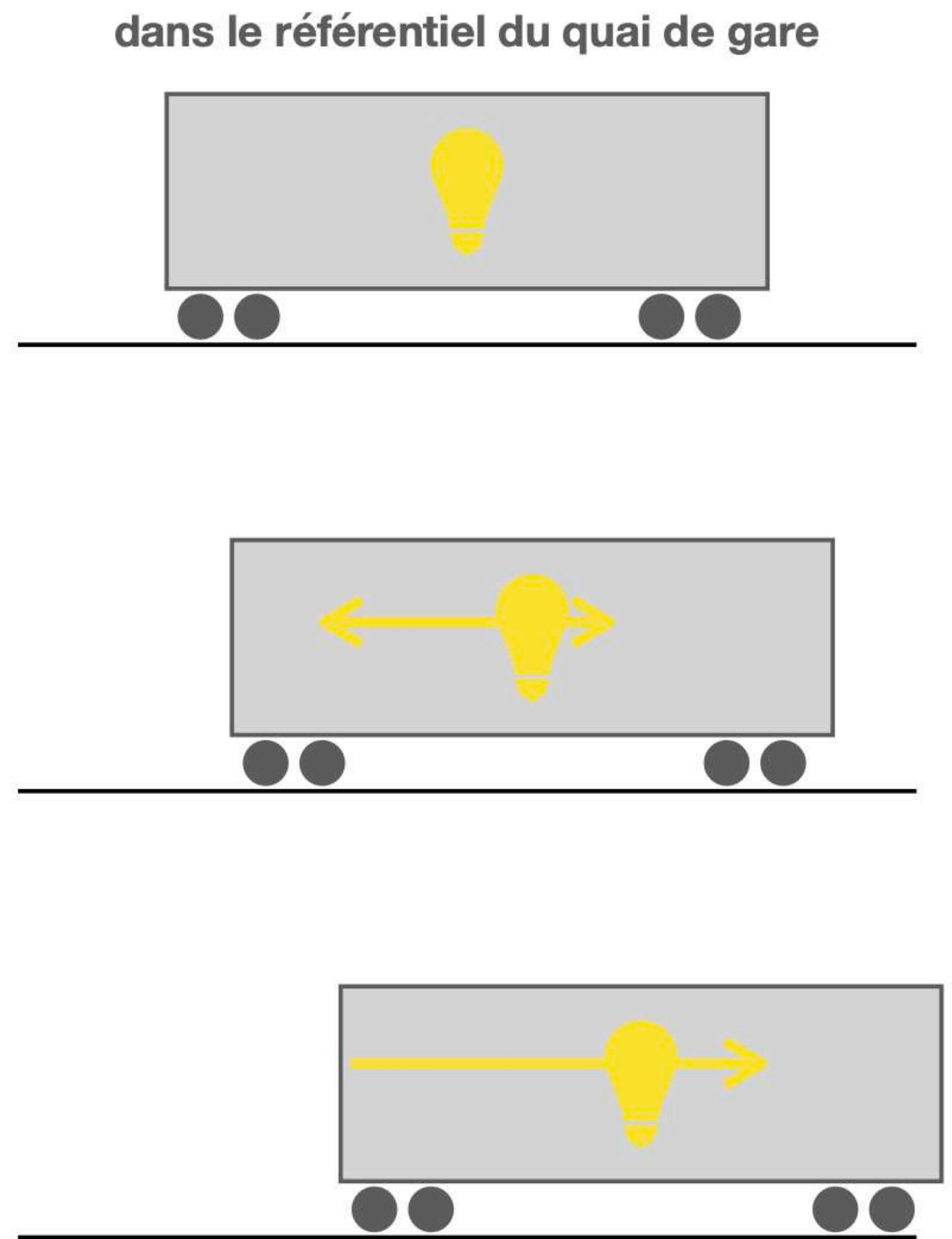
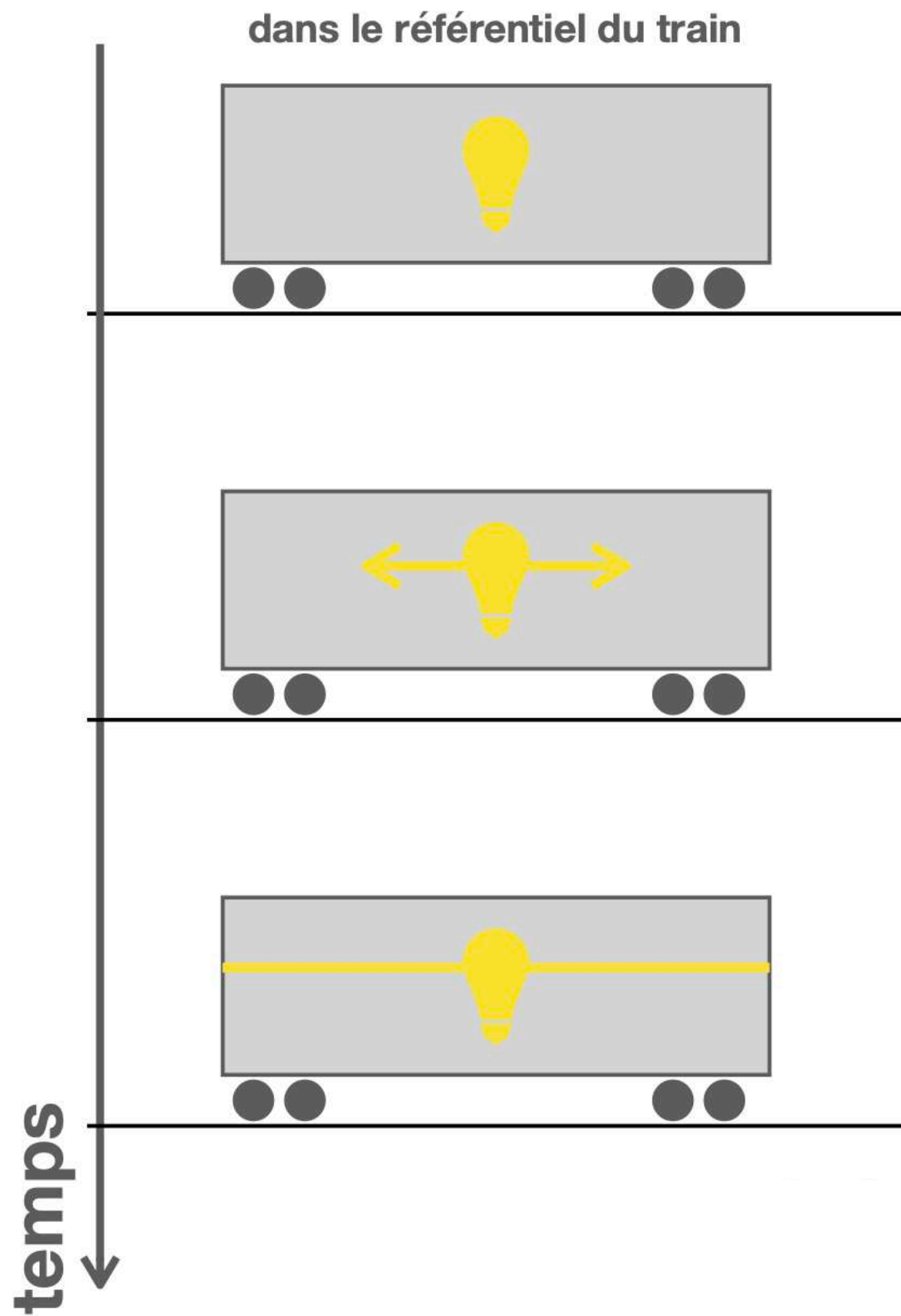
Cet énoncé semble très proche de la relativité galiléenne ...

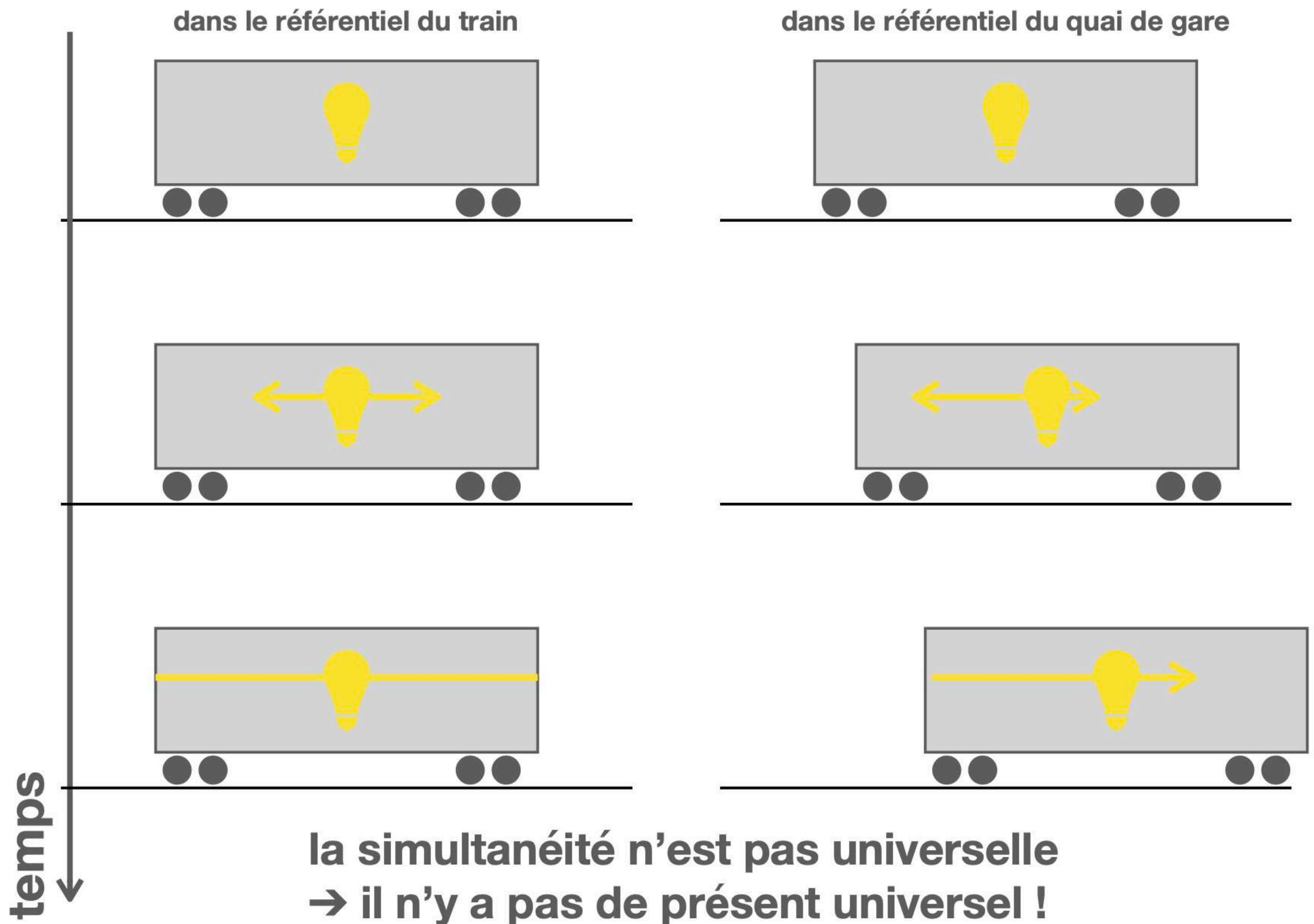
... pourtant, sous ce postulat :

- 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

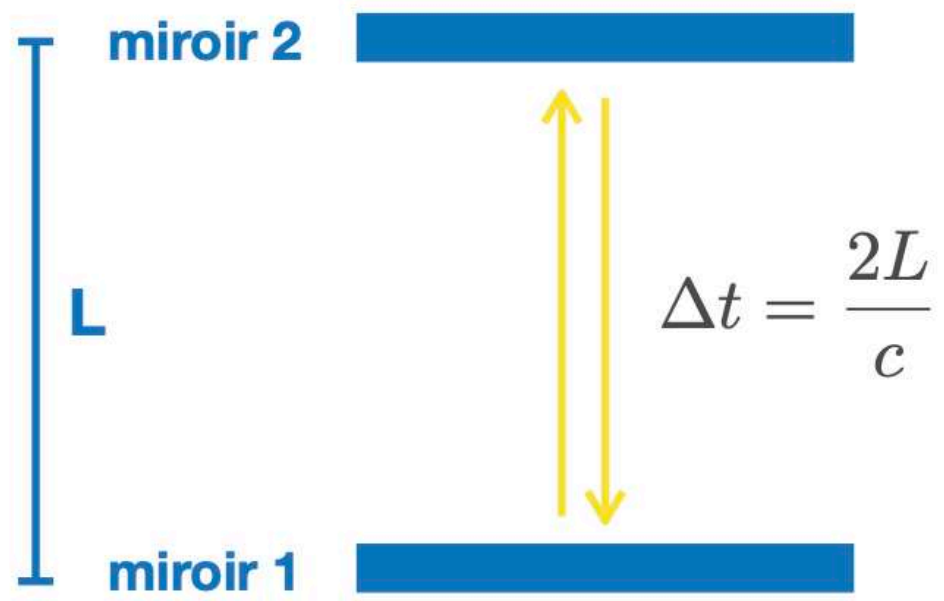
dans le référentiel du train



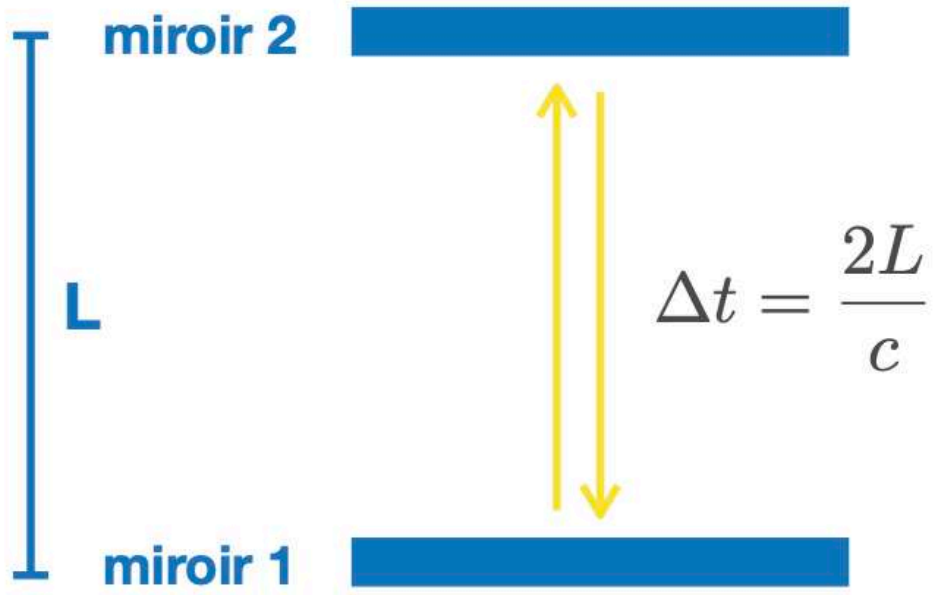




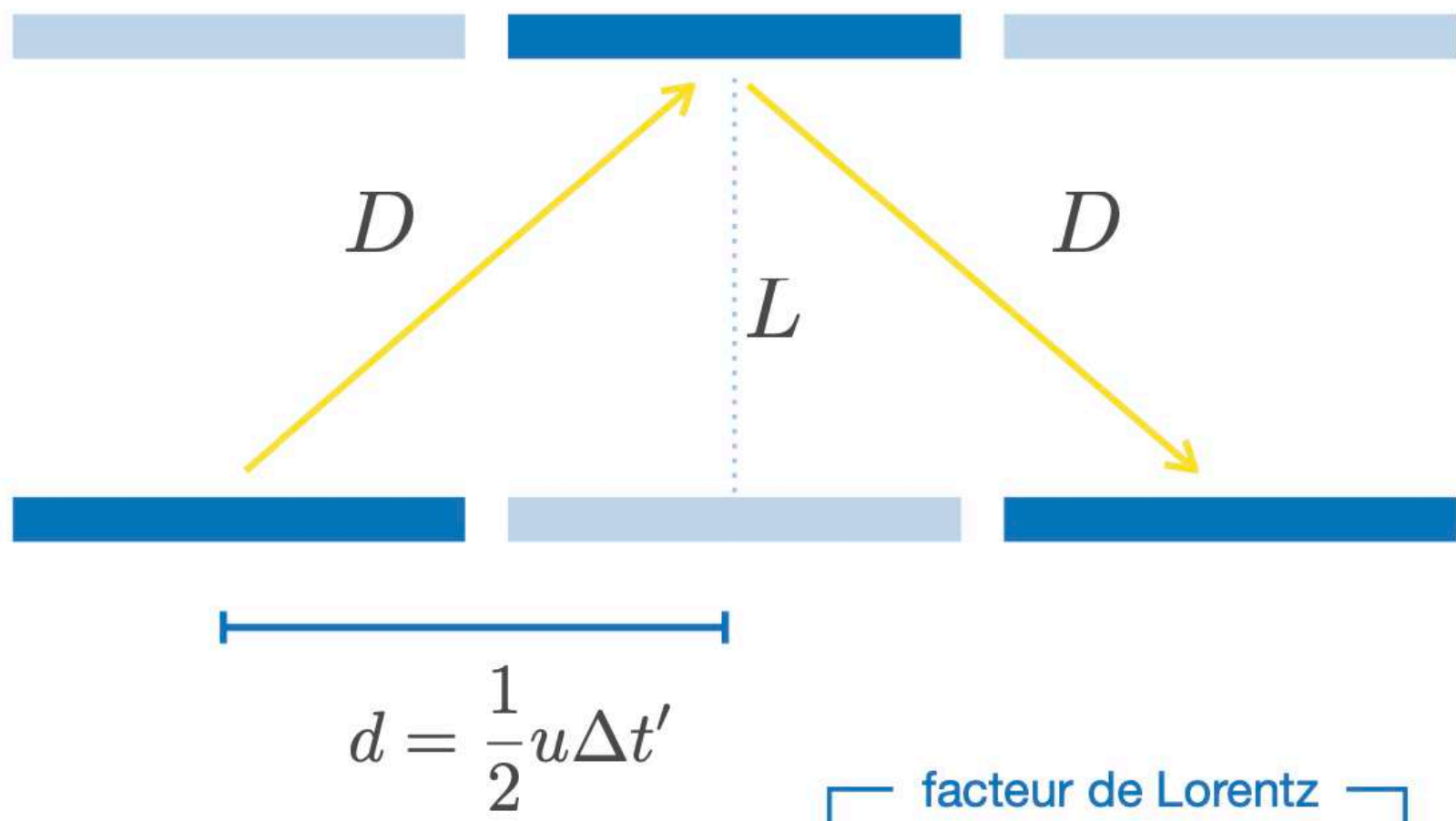
dans le référentiel du train



dans le référentiel du train



dans le référentiel du quai de gare



Pythagore + invariance de la vitesse de la lumière :

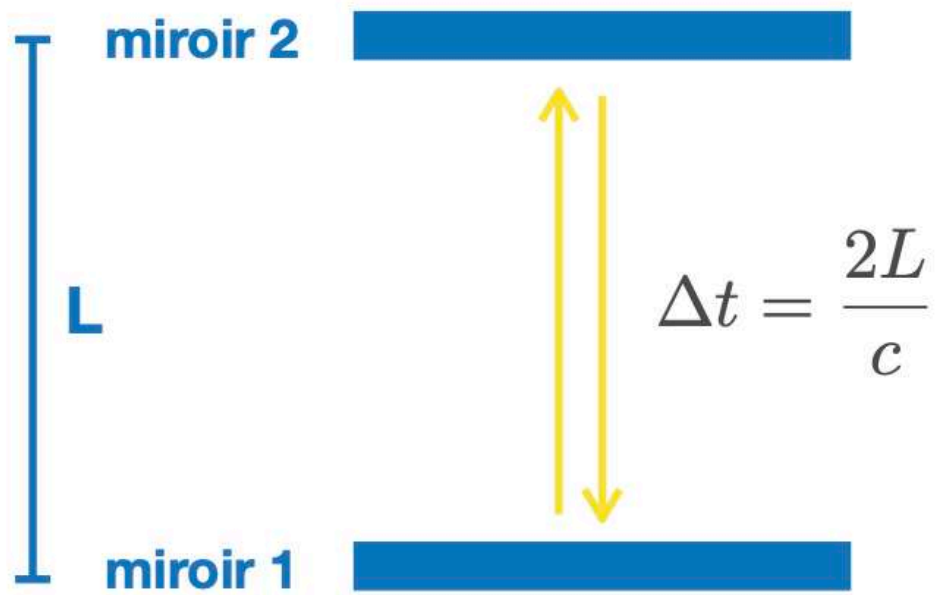
dilatation du temps

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

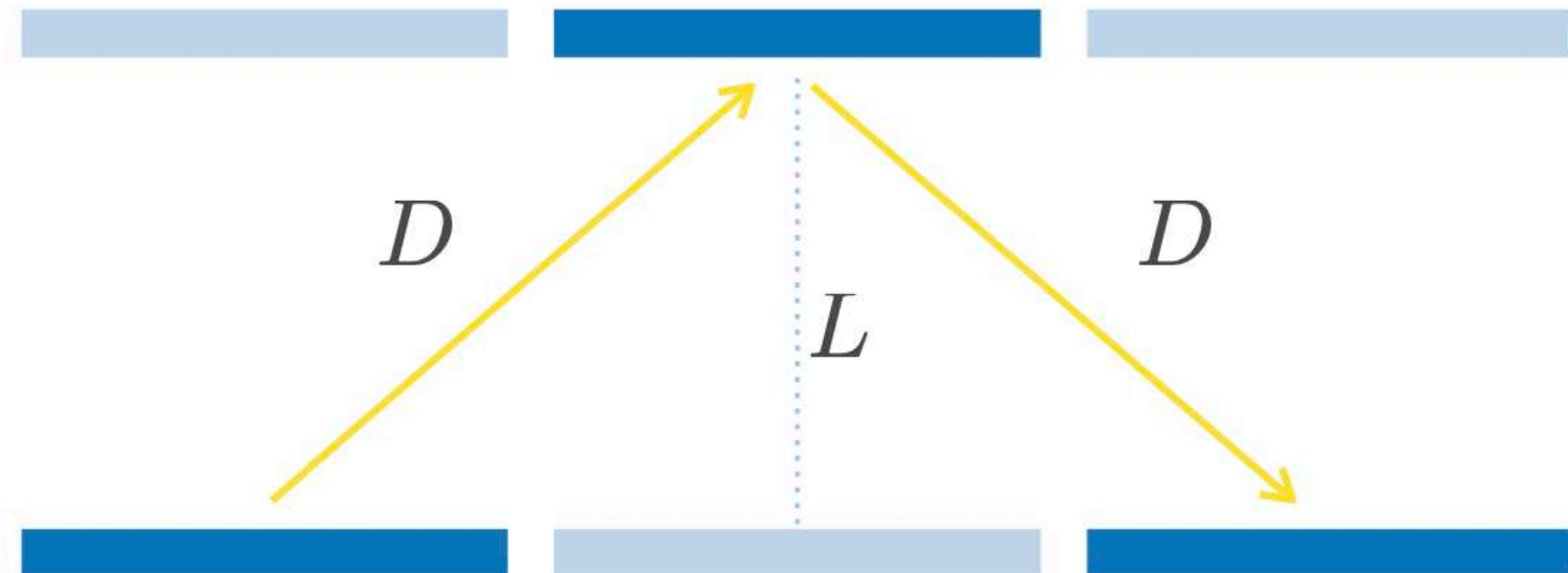
facteur de Lorentz

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

dans le référentiel du train



dans le référentiel du quai de gare



$$d = \frac{1}{2}u\Delta t'$$

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

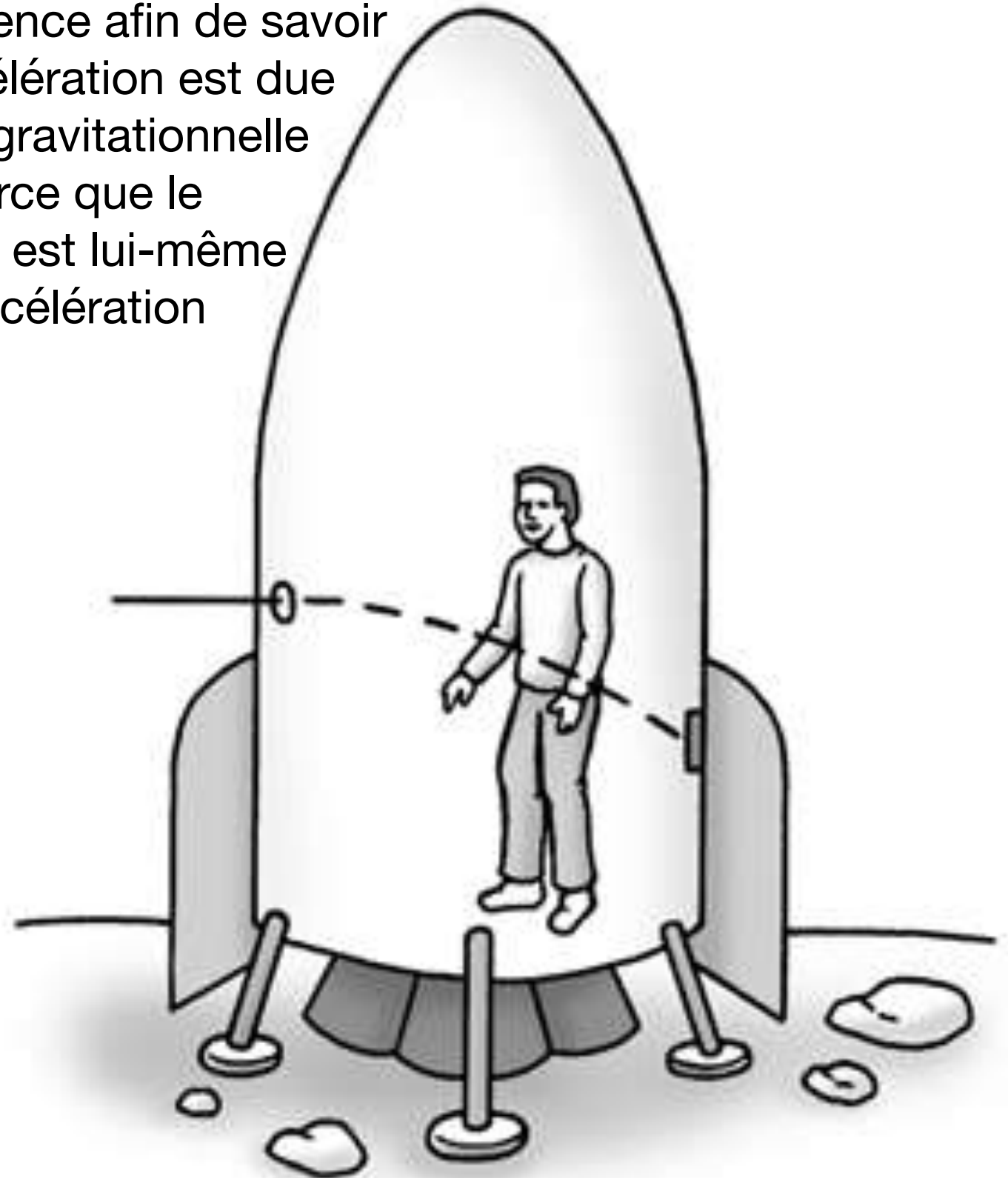
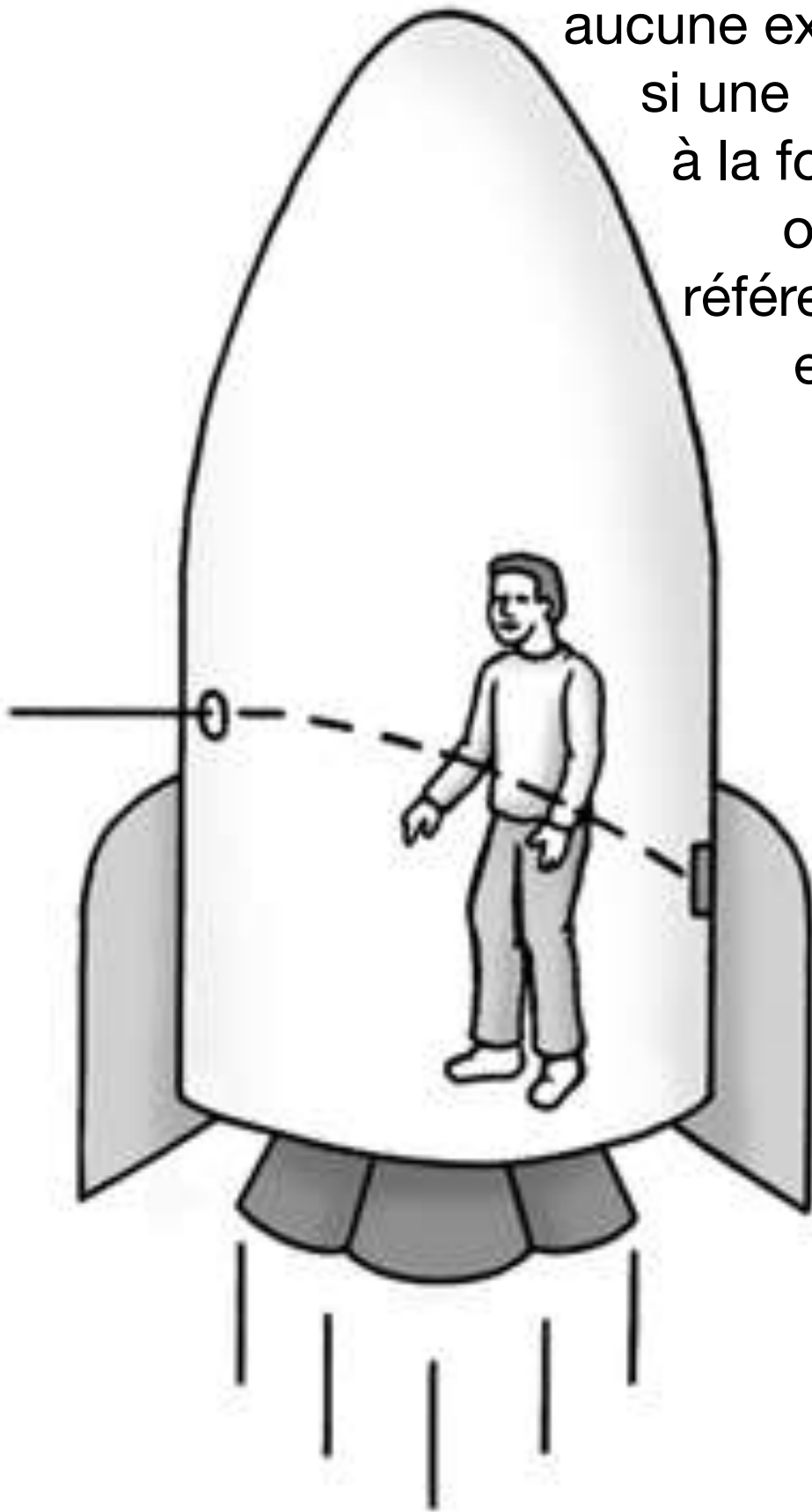
la relativité (restreinte)
= une nouvelle géométrie

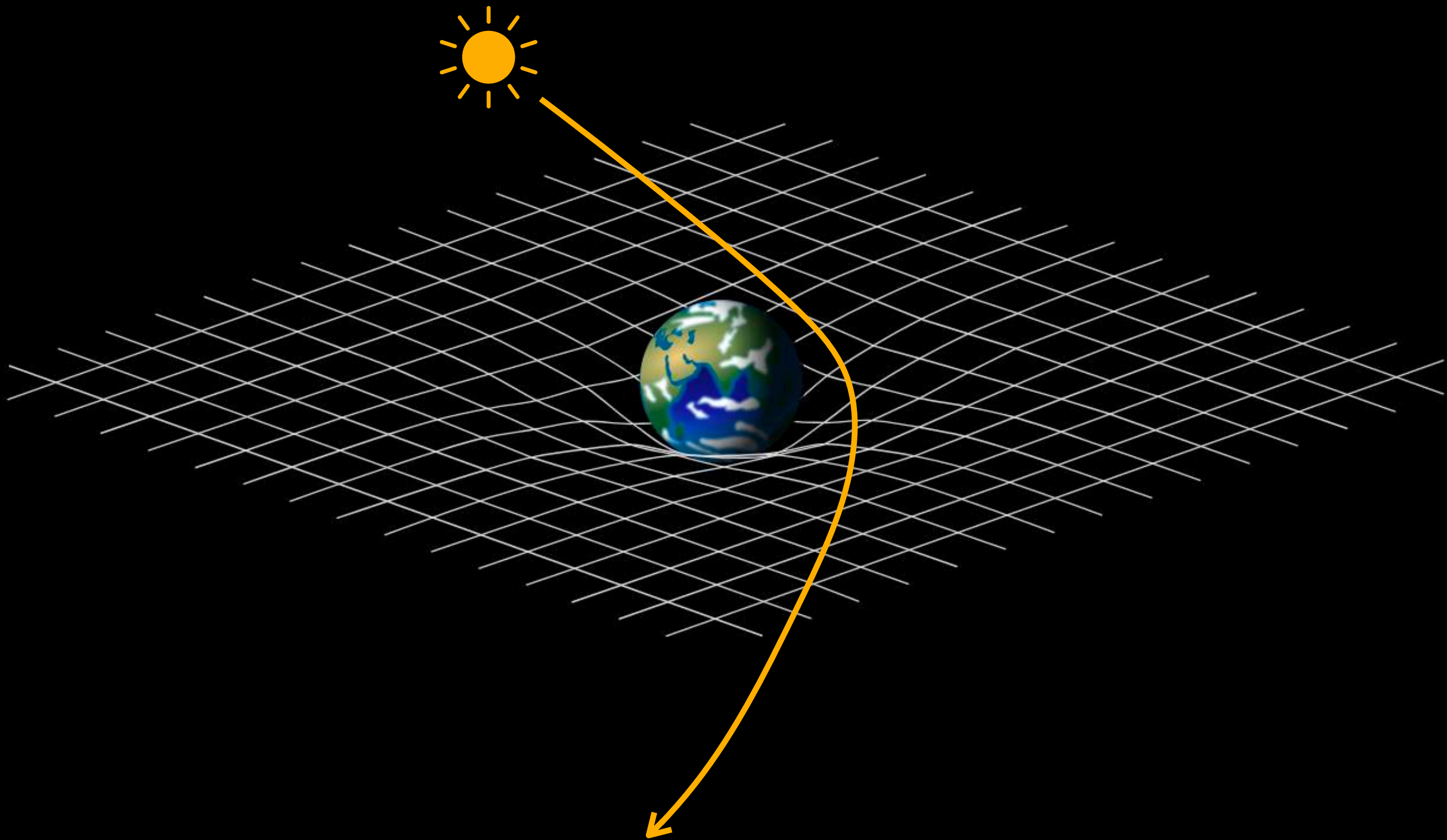
$$\text{événement} = \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

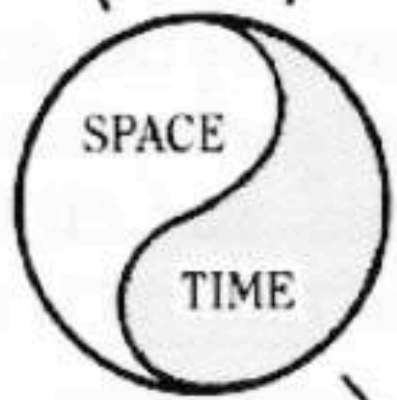
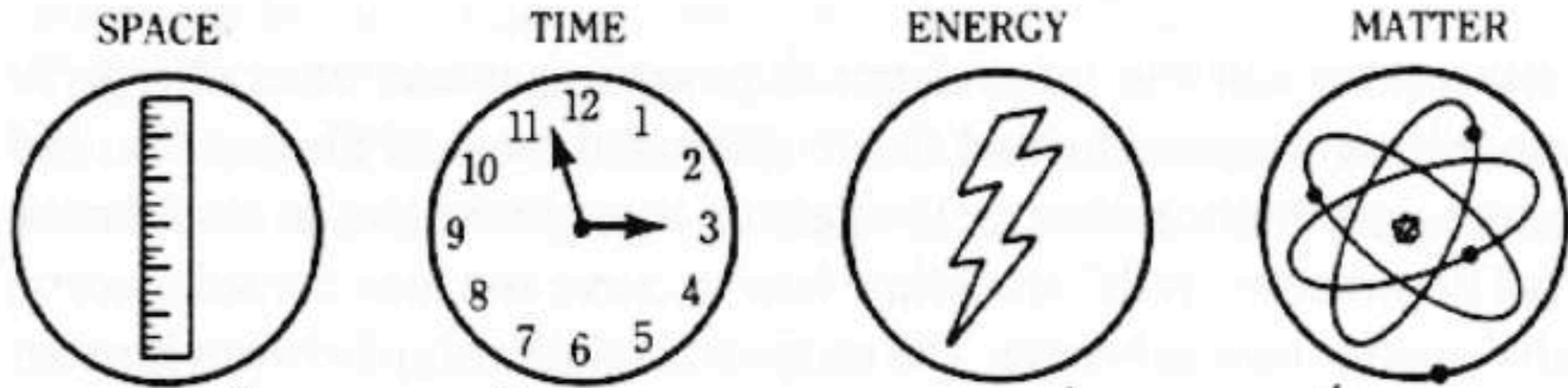
principe d'équivalence : il n'existe aucune expérience afin de savoir si une accélération est due à la force gravitationnelle ou parce que le référentiel est lui-même en accélération



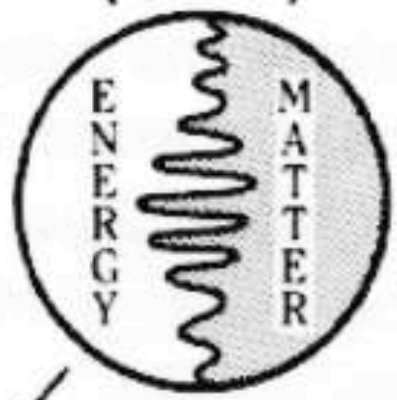
principe d'équivalence : il n'existe aucune expérience afin de savoir si une accélération est due à la force gravitationnelle ou parce que le référentiel est lui-même en accélération



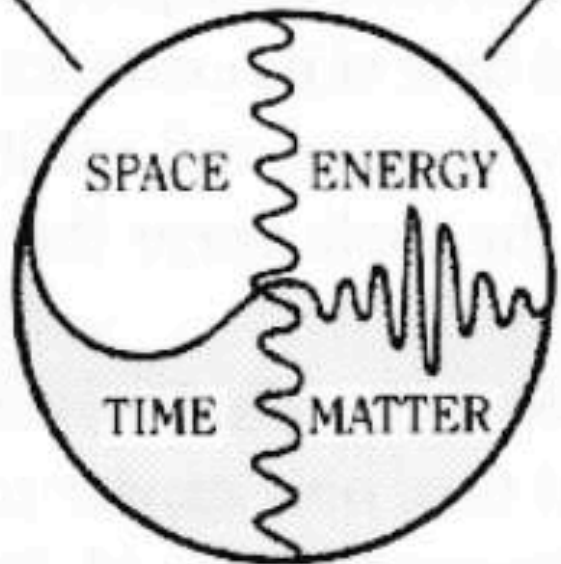




1905 SPECIAL THEORY OF RELATIVITY



1905 ENERGY-MASS EQUIVALENCE



1915 GENERAL THEORY OF RELATIVITY

géométrie de l'espace-temps

$$G_{\mu\nu}$$

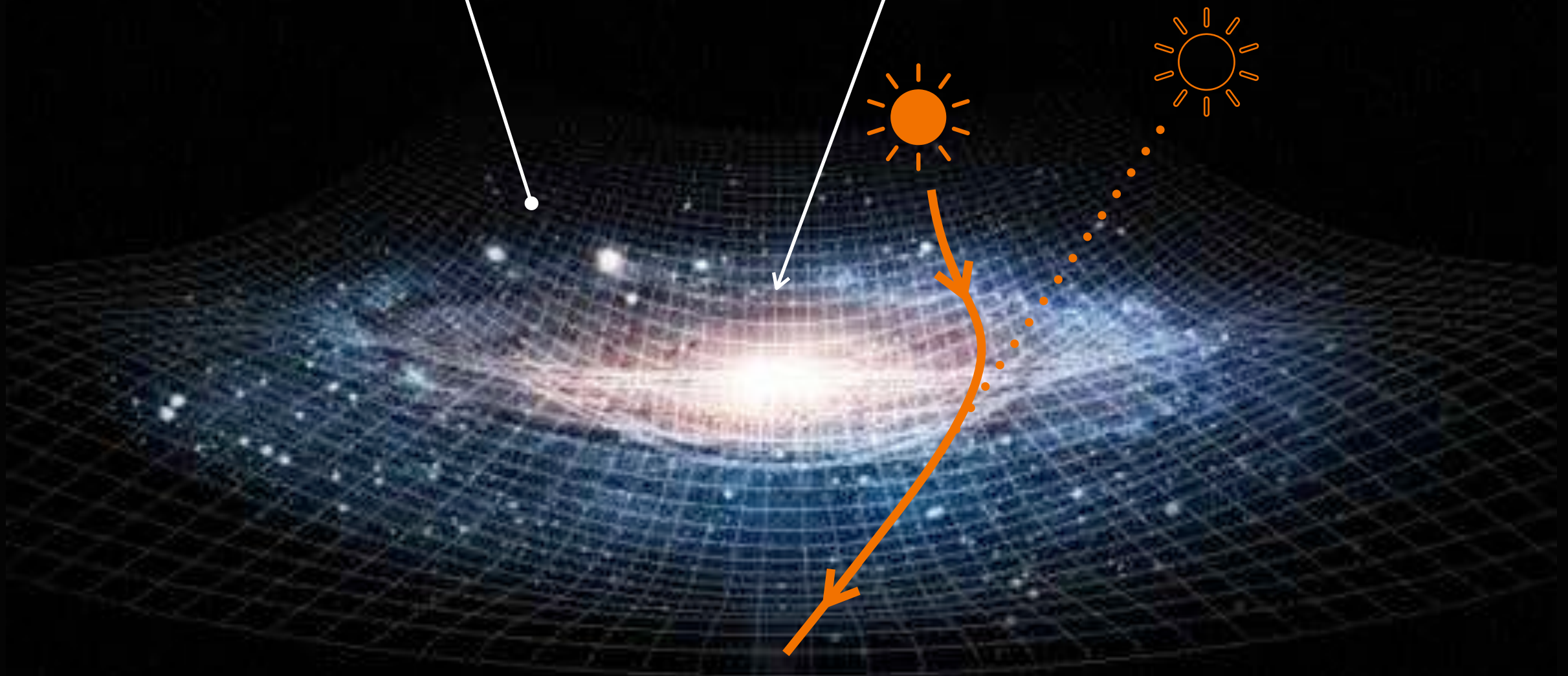
$$= \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

contenu énergétique

l'espace-temps, nouvelle description de la gravité

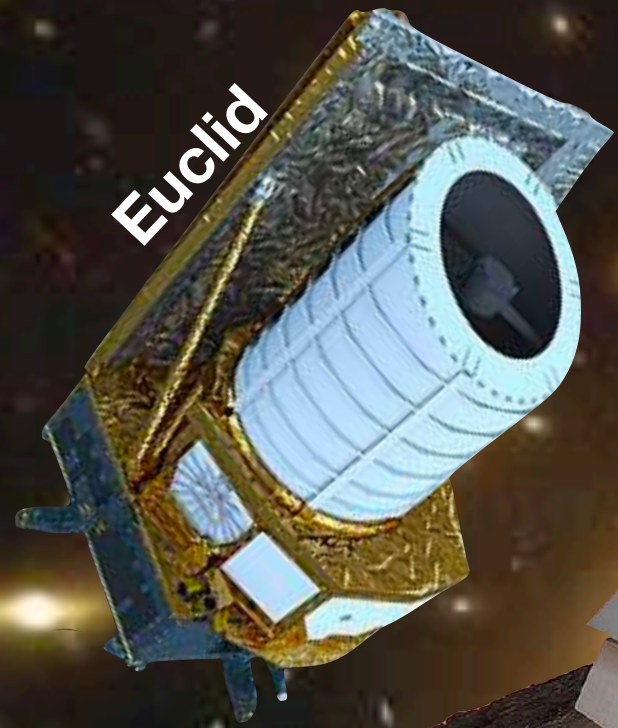


$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



l'espace-temps, nouvelle description de la gravité

Euclid

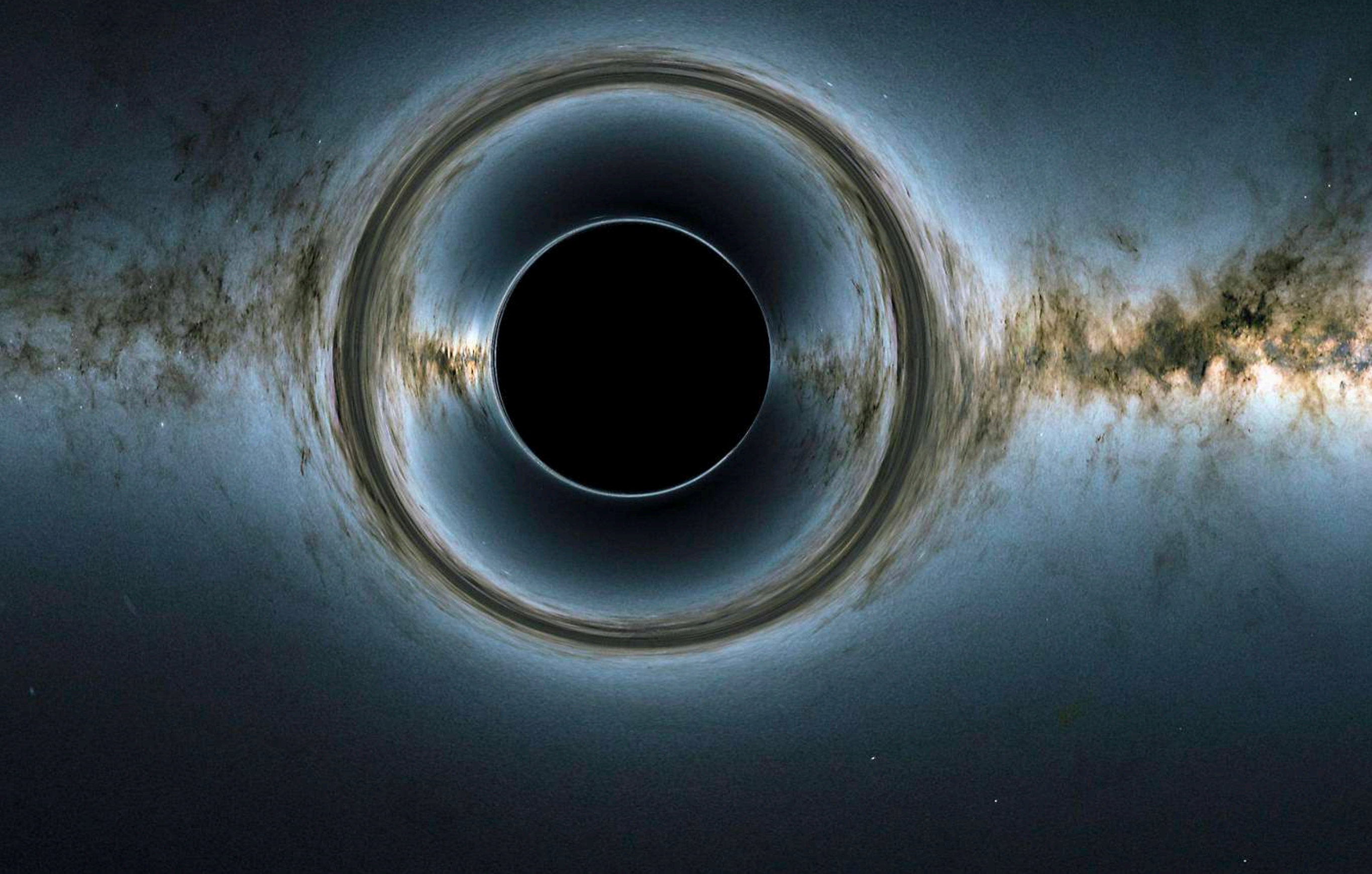


Vera Rubin Observatory (LSST)



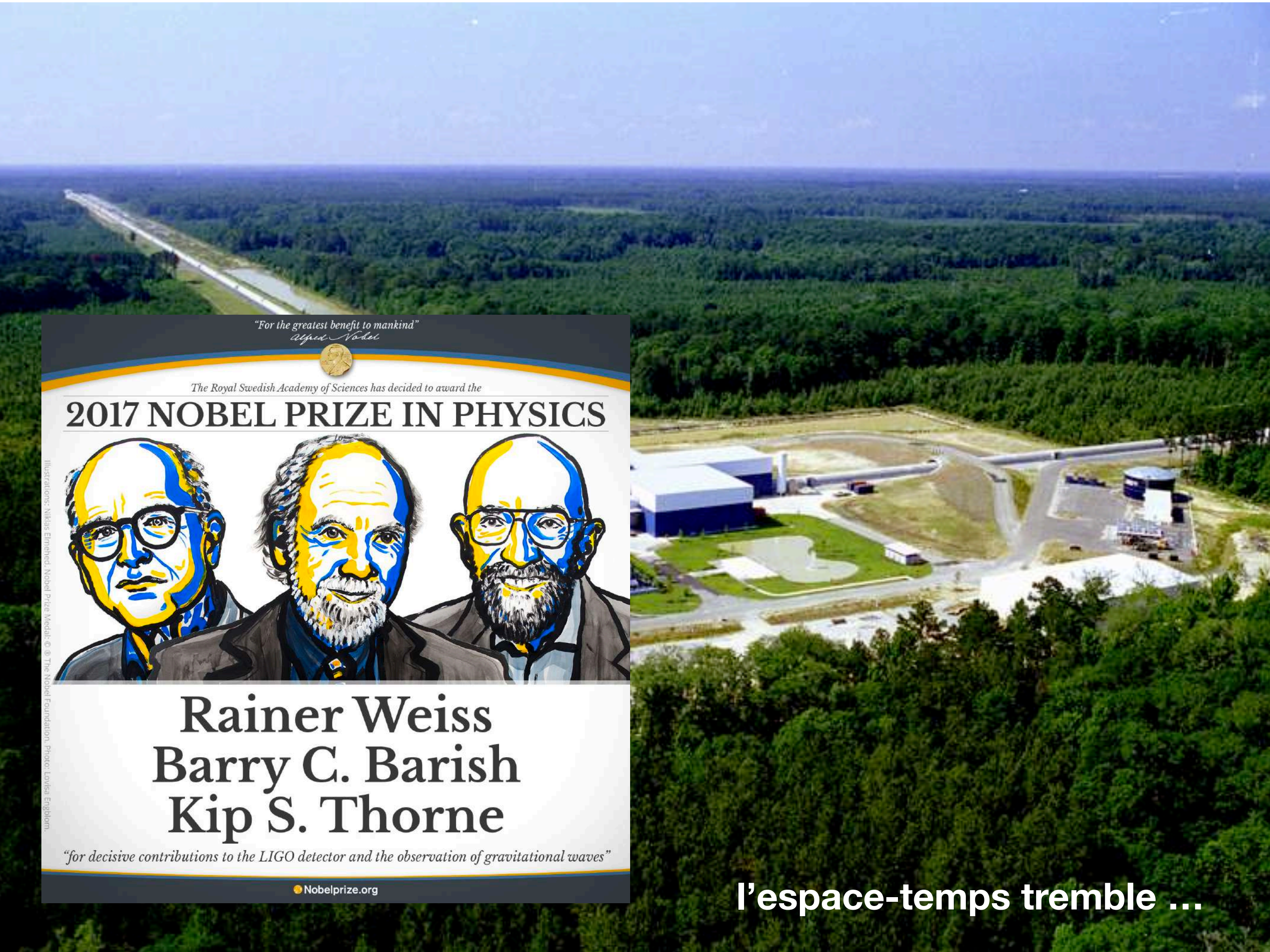
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

les trous noirs



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

l'espace-temps peut trembler



"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel



The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

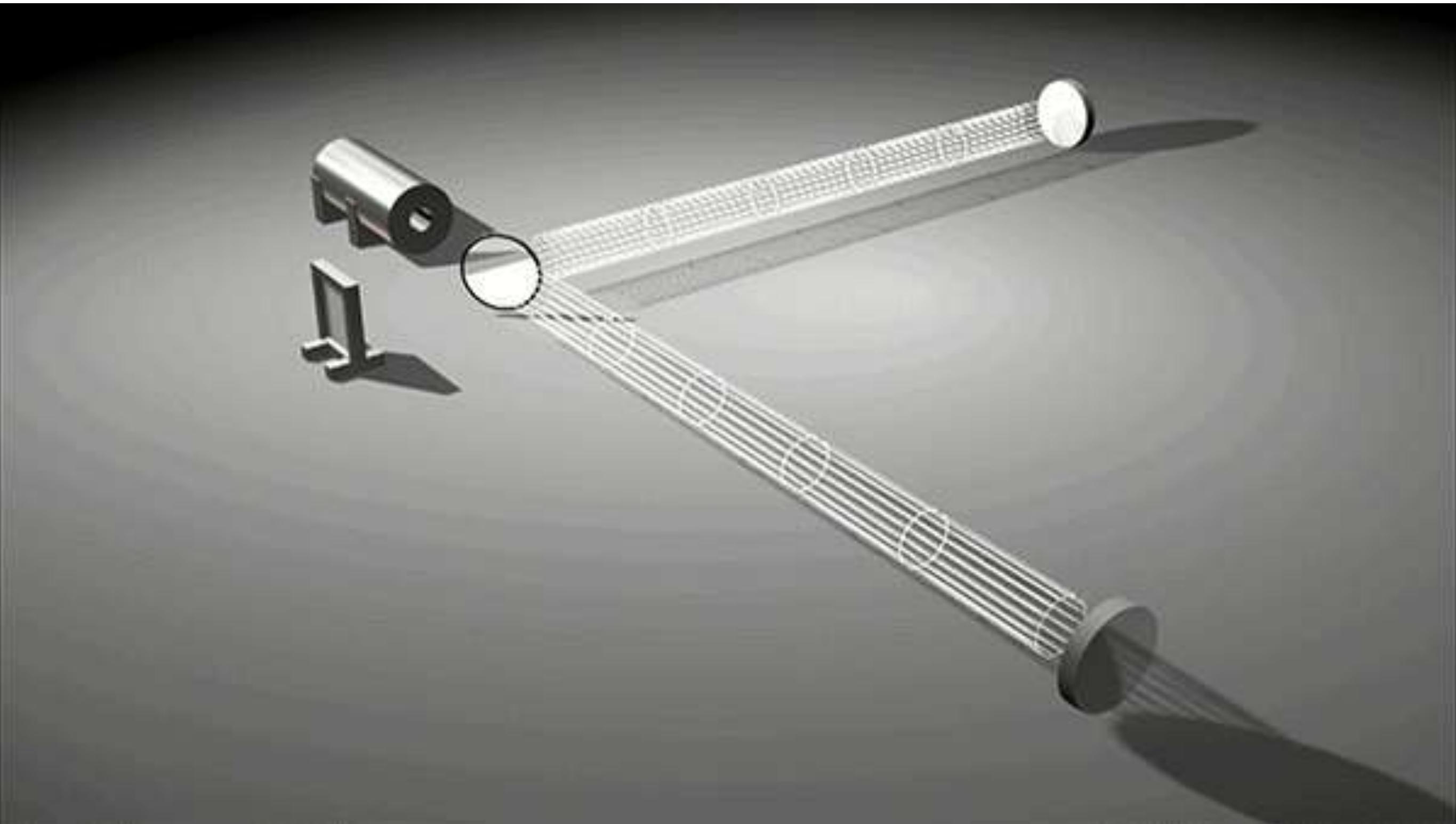


**Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne**

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

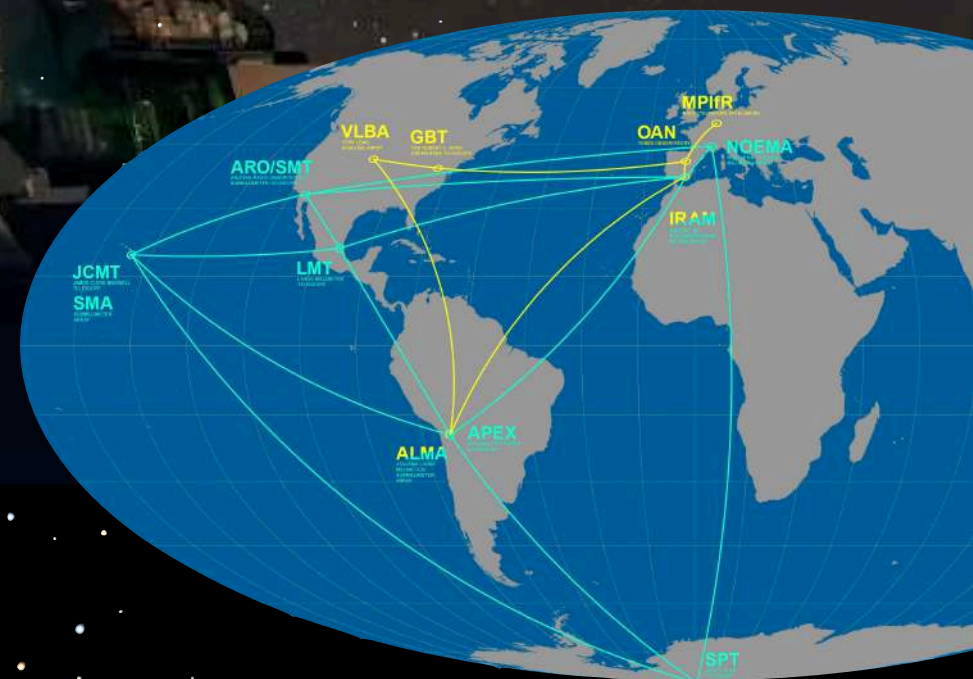
 Nobelprize.org

l'espace-temps tremble ...





les trous noirs ont une réalité physique



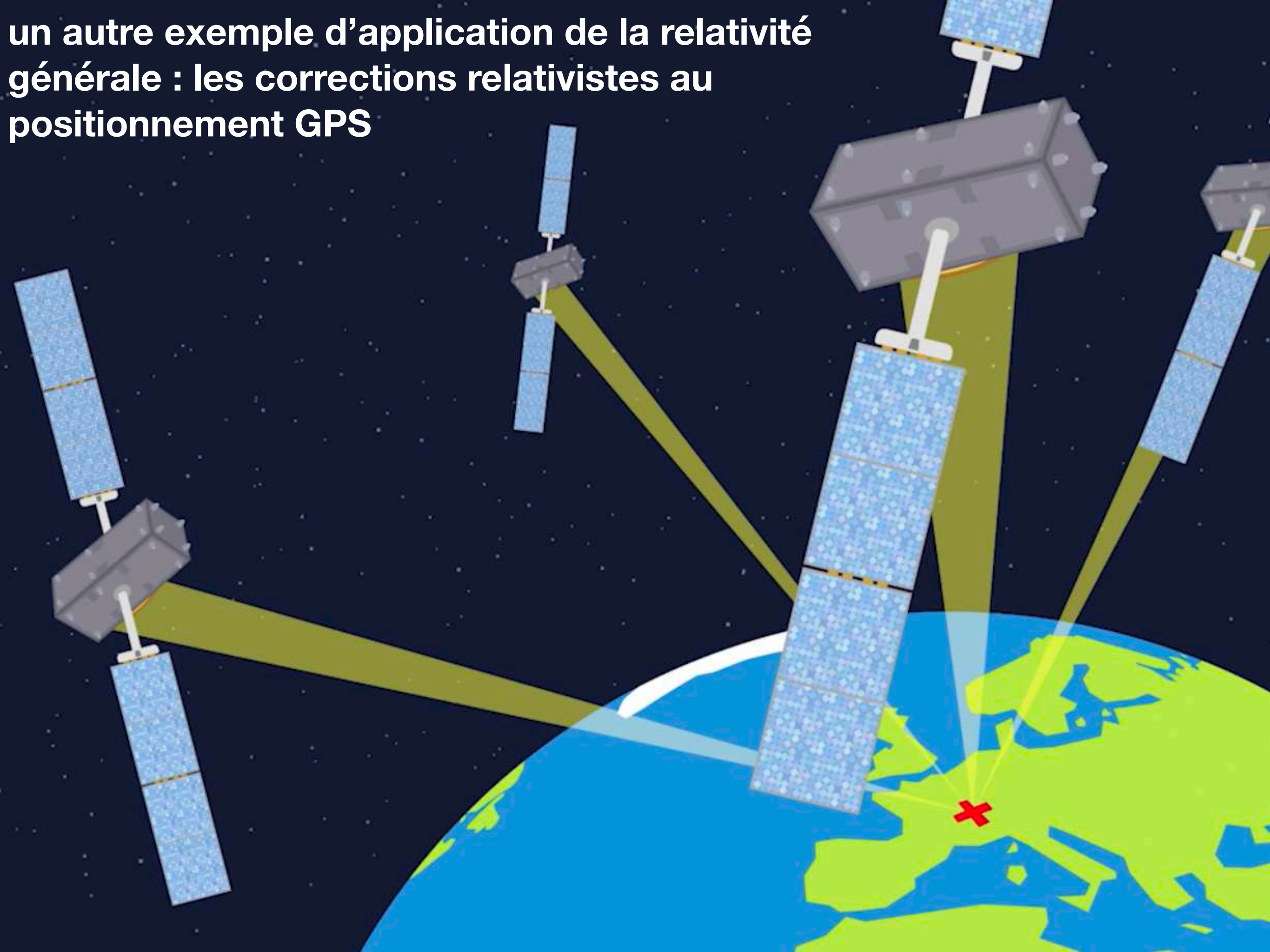


les trous noirs ont une réalité physique

J. Errard — St Dizier — 26 mai 2023

EHT Collaboration

un autre exemple d'application de la relativité générale : les corrections relativistes au positionnement GPS



Deuxième chapitre de cette conférence : le modèle du Big Bang

Quelle application
pour la cosmologie?

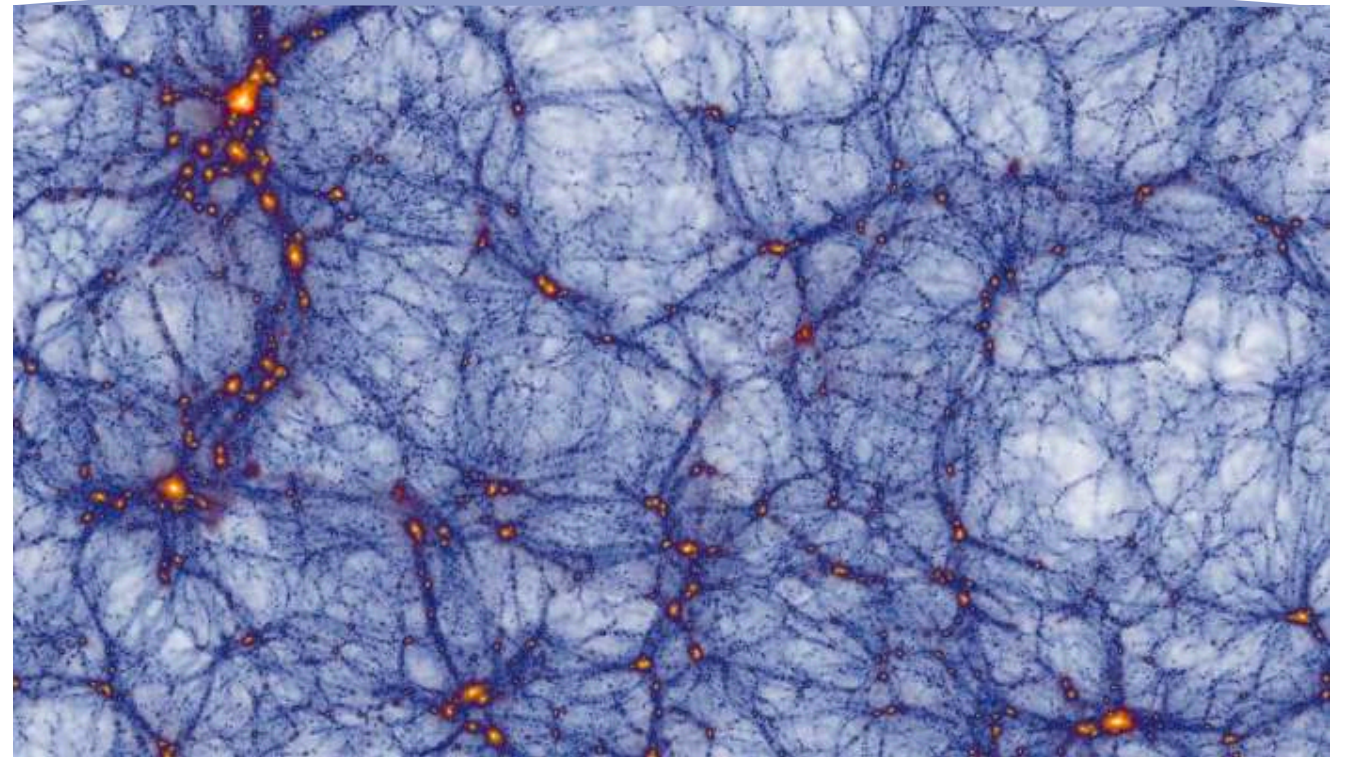
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



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

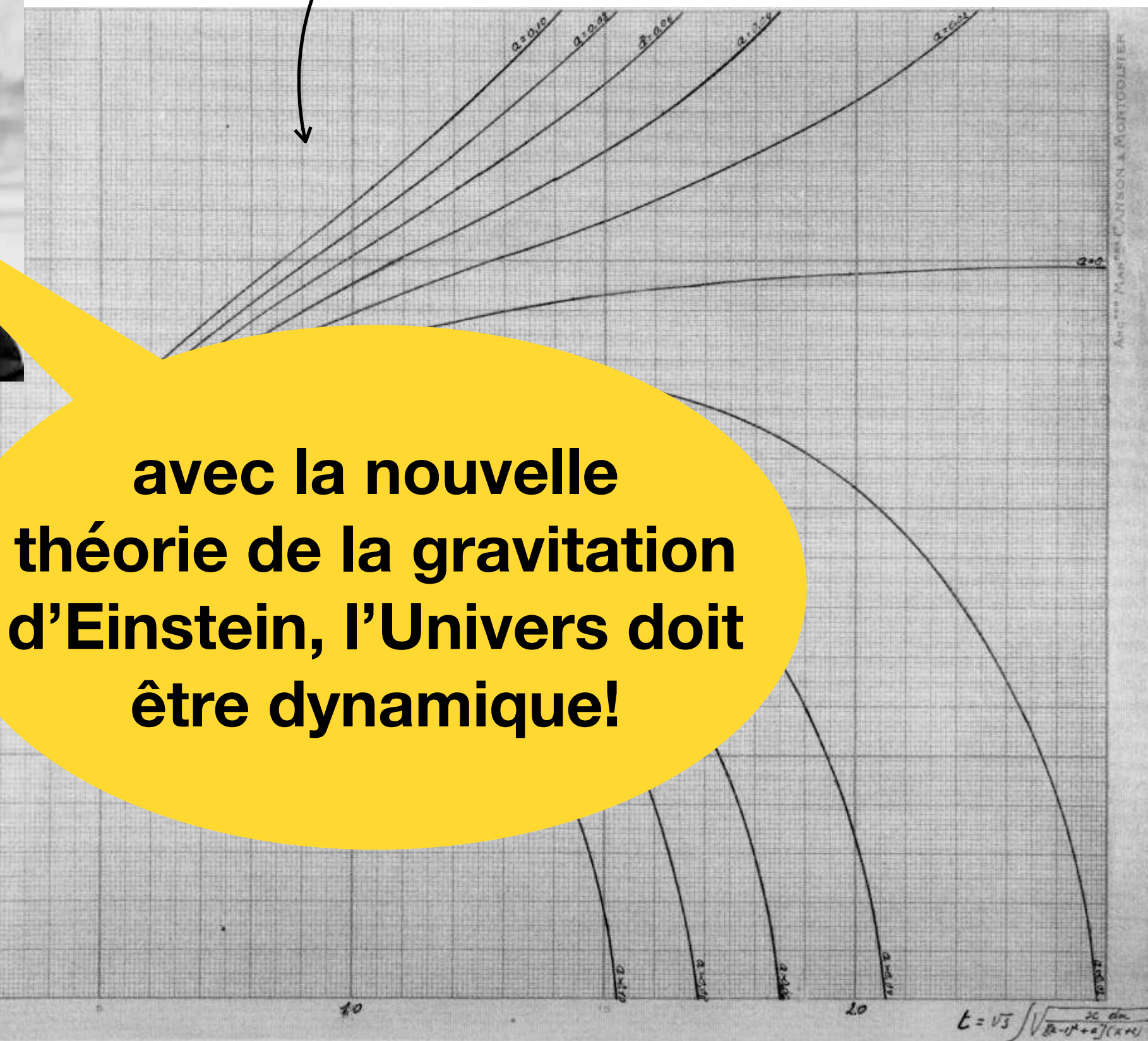




Georges Lemaître (1894-1966)

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

Univers homogène

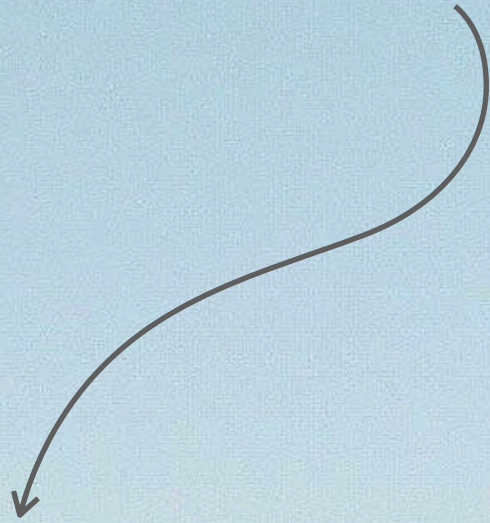


**avec la nouvelle
théorie de la gravitation
d'Einstein, l'Univers doit
être dynamique!**

taille de l'Univers ↑

temps →

Mont Wilson à Los Angeles

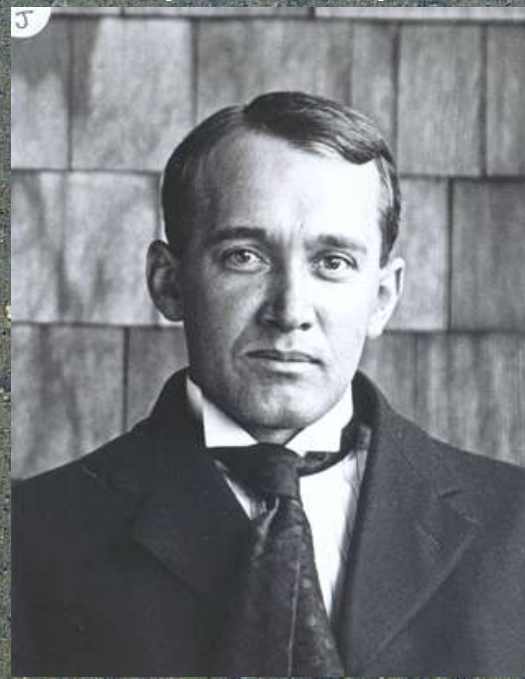


Henrietta Swan Leavitt
(1868-1921)

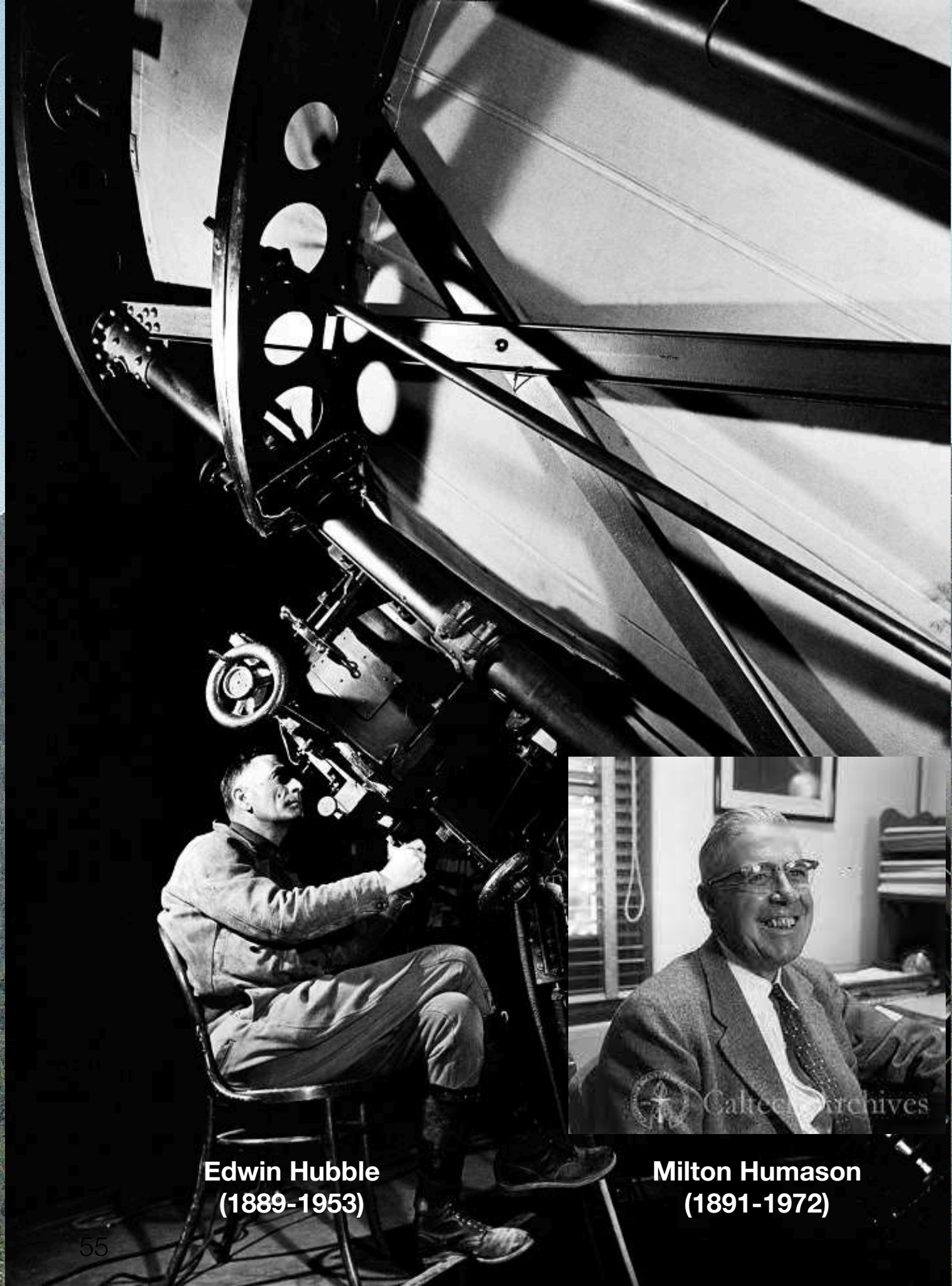


mesure des distances grâce aux Céphéides

Vesto Melvin Slipher
(1875-1969)



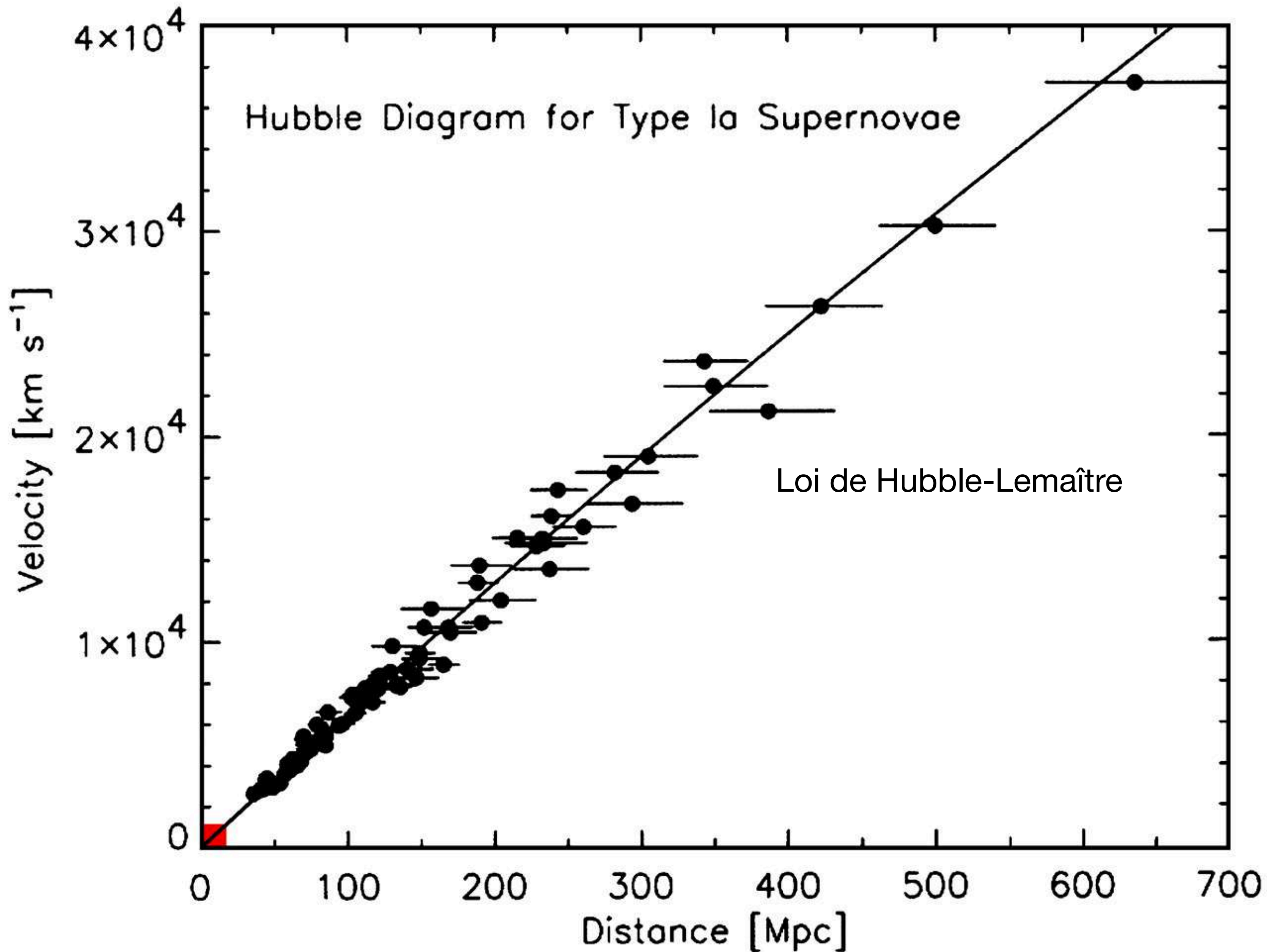
décalage vers le rouge des nébuleuses



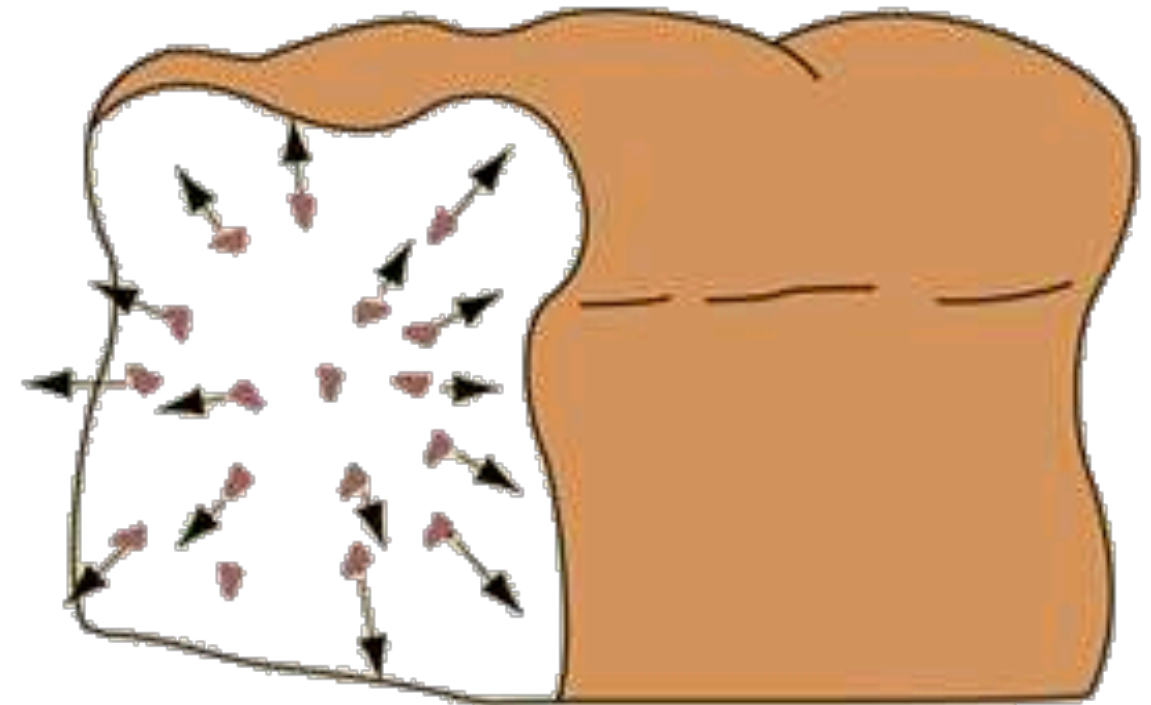
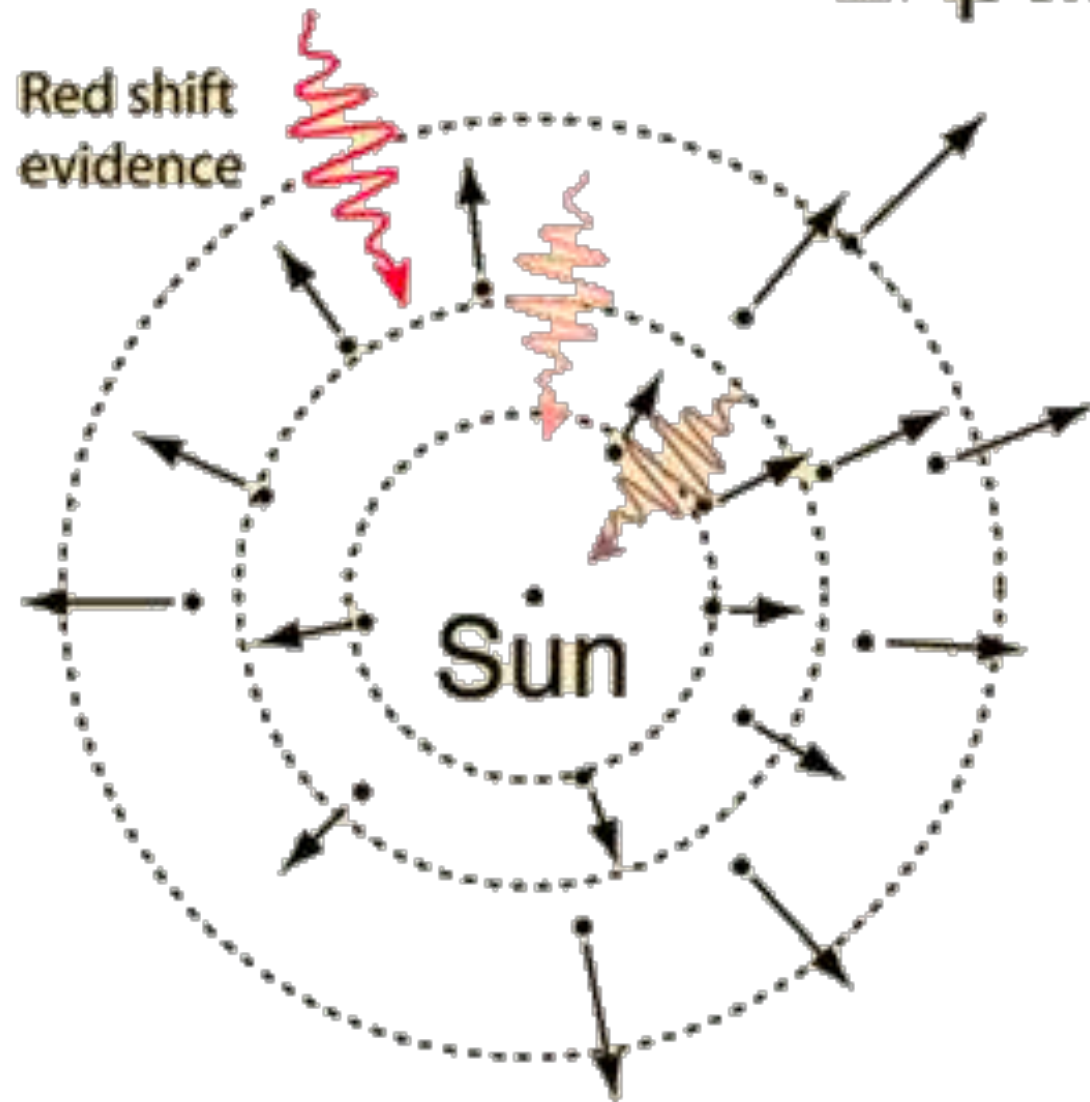
Edwin Hubble
(1889-1953)



Milton Humason
(1891-1972)

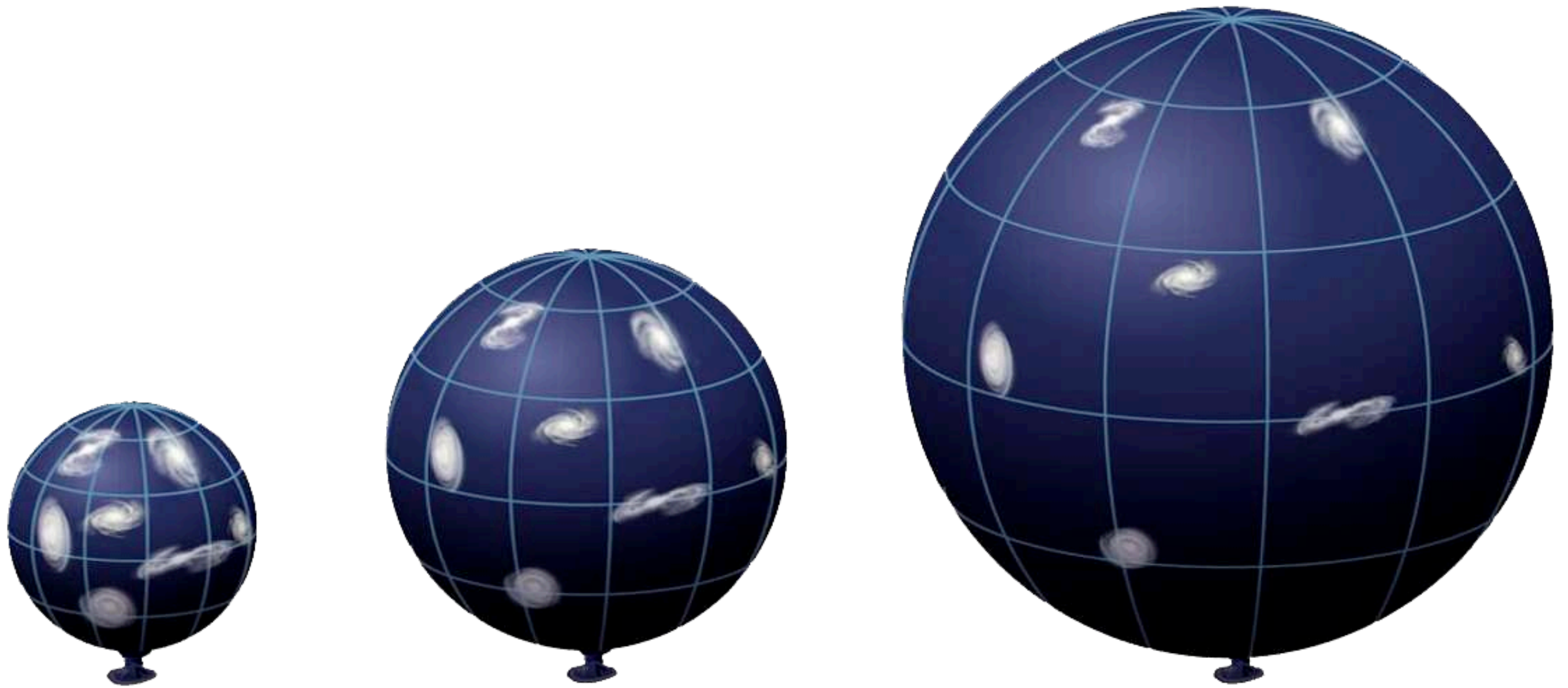


Expanding universe



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

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



→
temps

la théorie du Big Bang

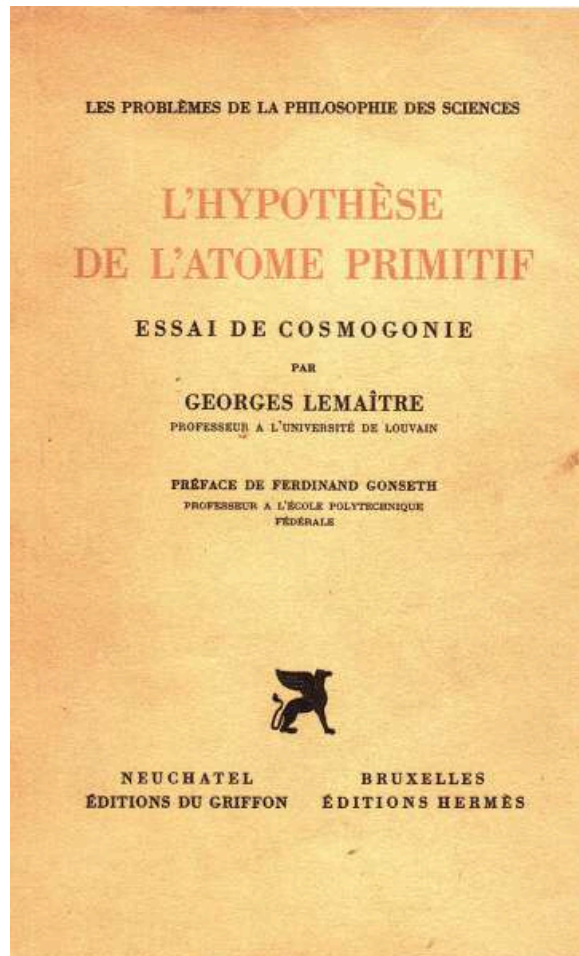


expansion
de l'espace-
temps

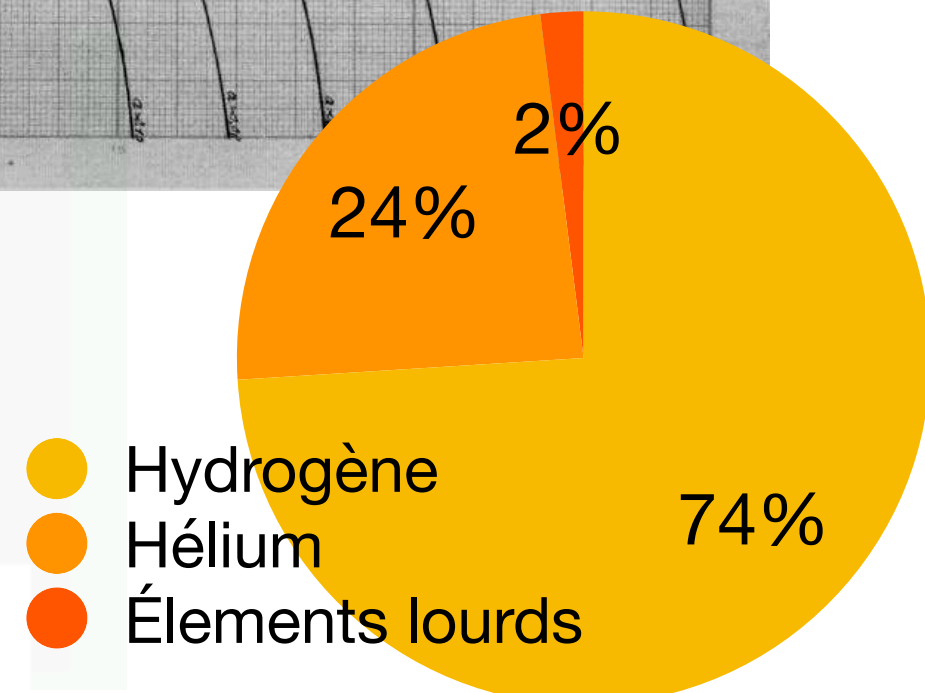
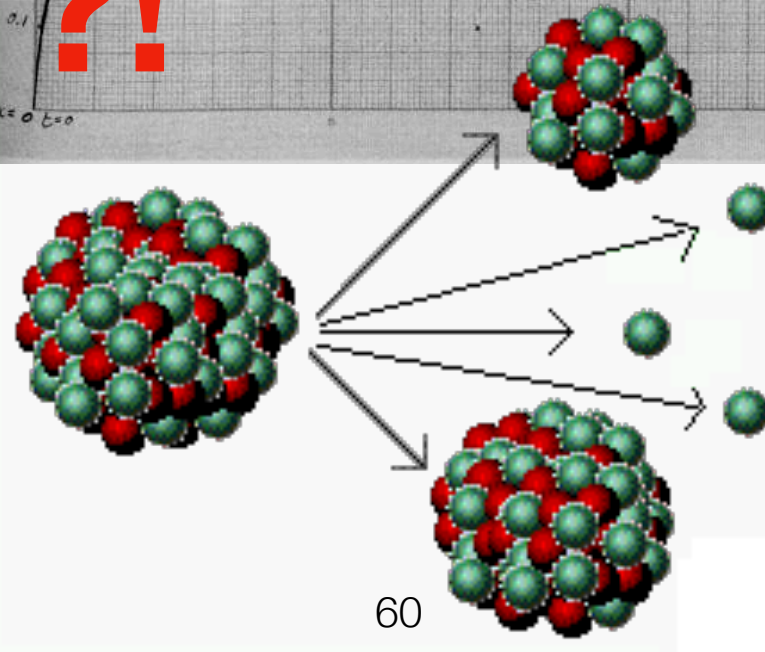
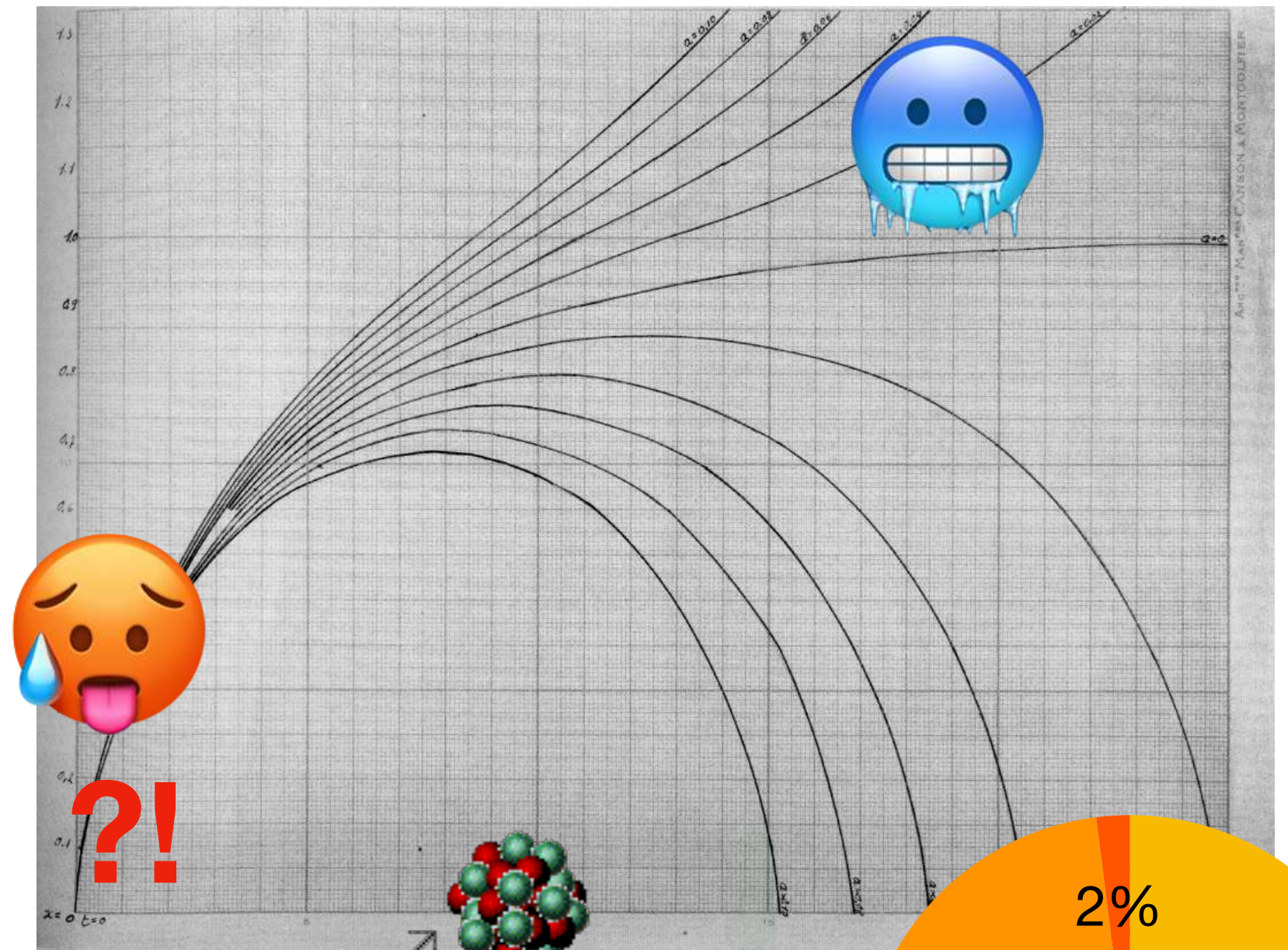
Loi de Hubble-Lemaître



Georges Lemaître
(1894-1966)



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

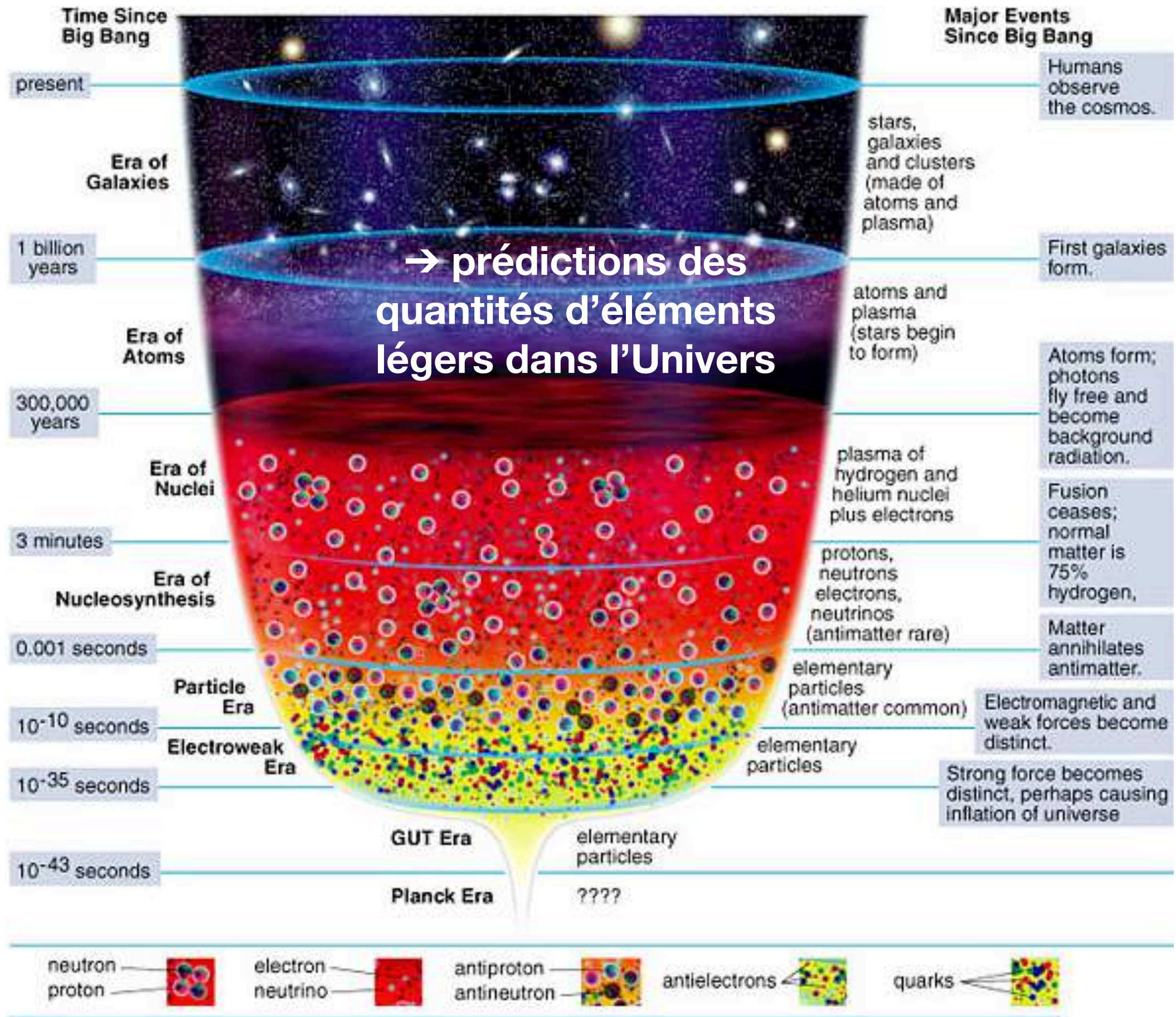


Georges Gamow (1904-1968)

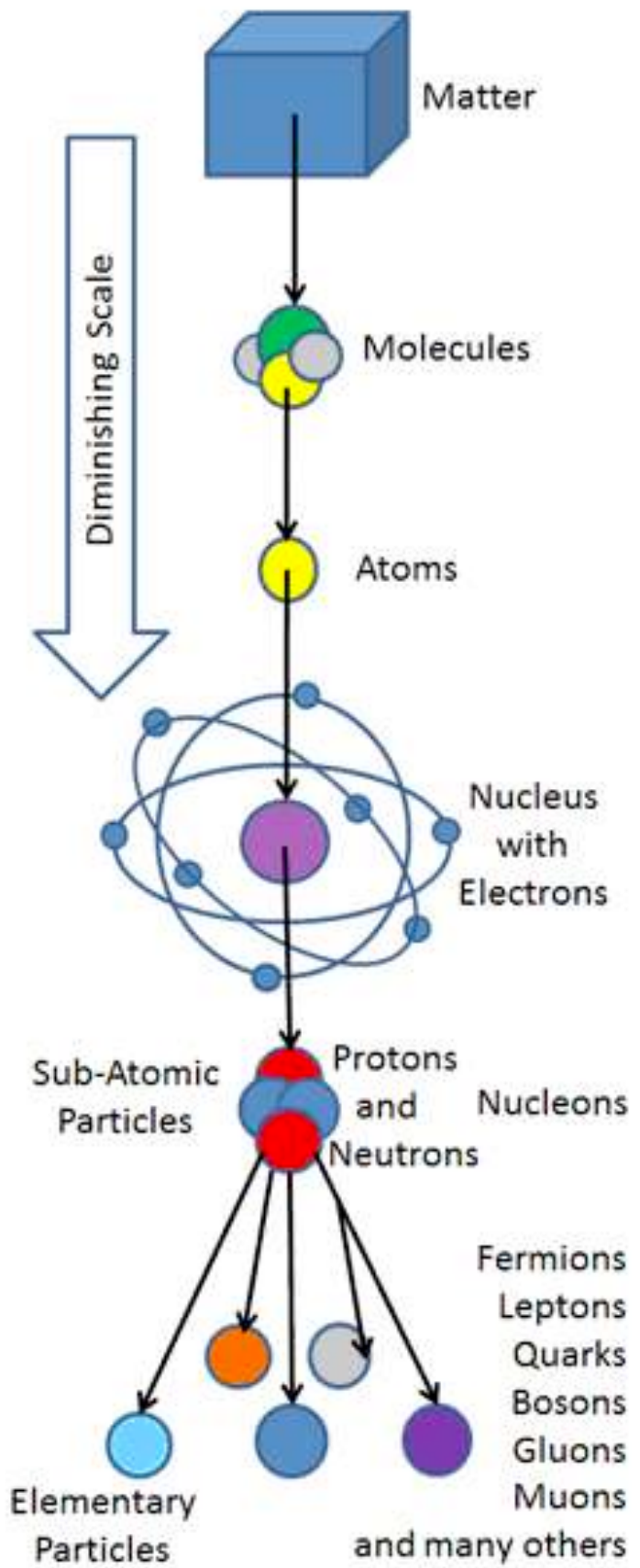


“Les éléments chimiques ont été cuisinés en moins de temps qu’il n’en faut pour faire cuire un oeuf”

J. Errard, Rencontres de

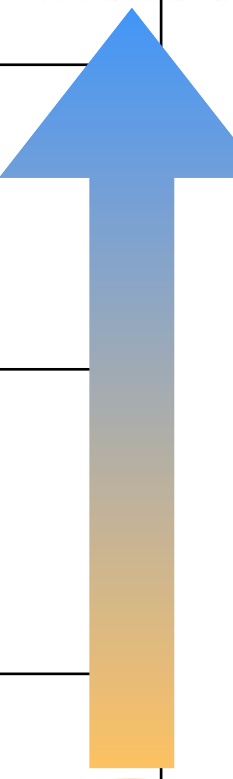


Particle Hierarchy

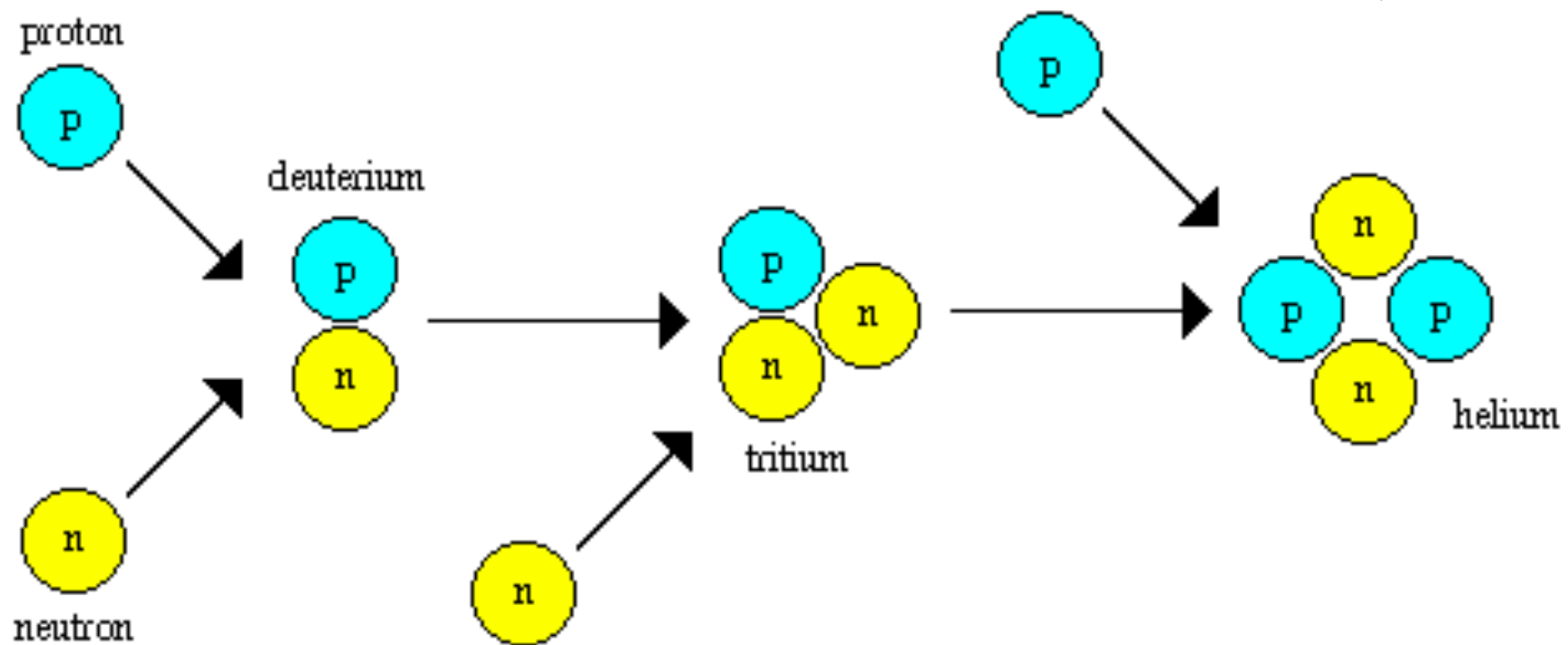
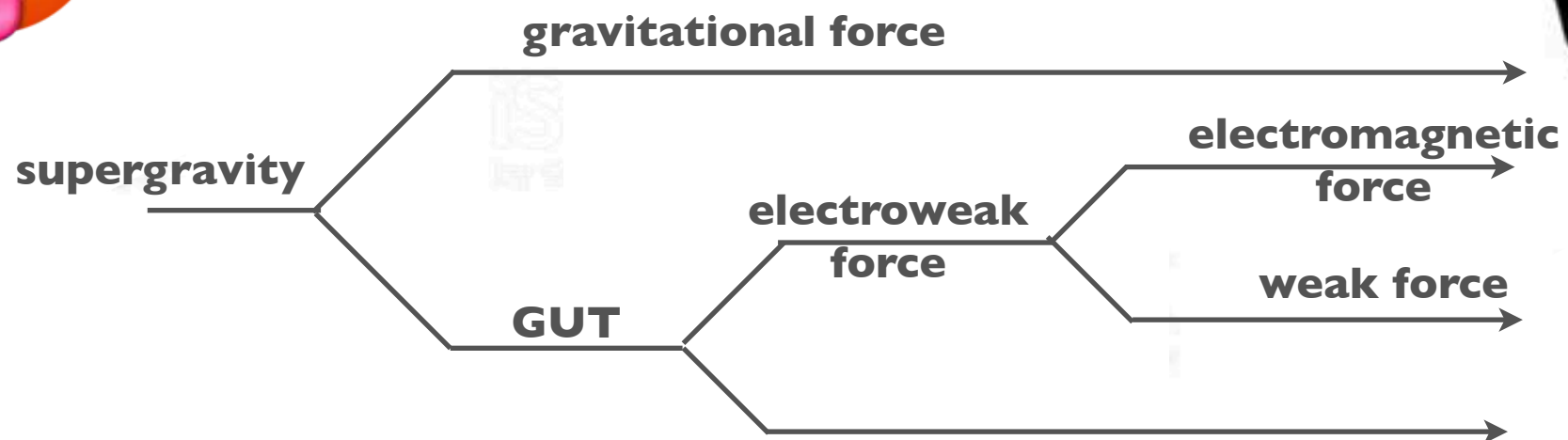


Pour comprendre la physique du plasma dense et chaud, il faut parler d'énergie/de température de liaison

	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?**

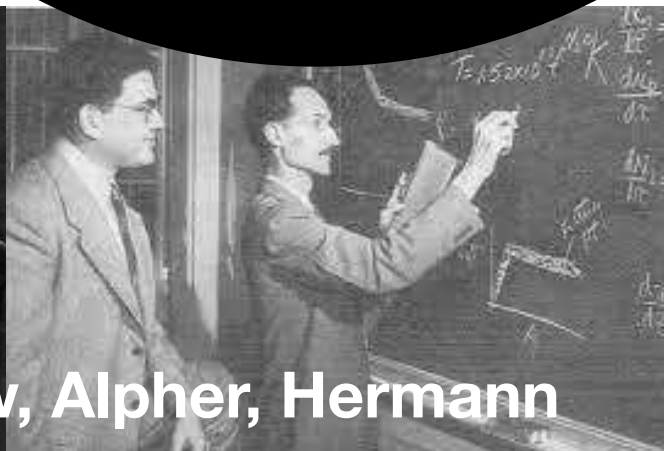
la théorie du Big Bang



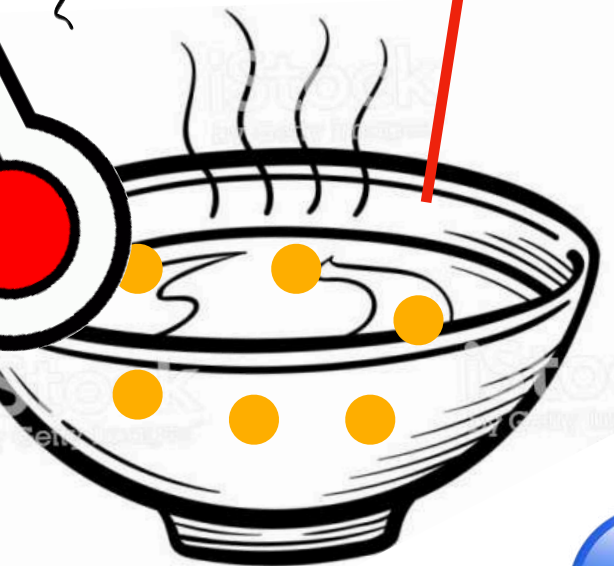
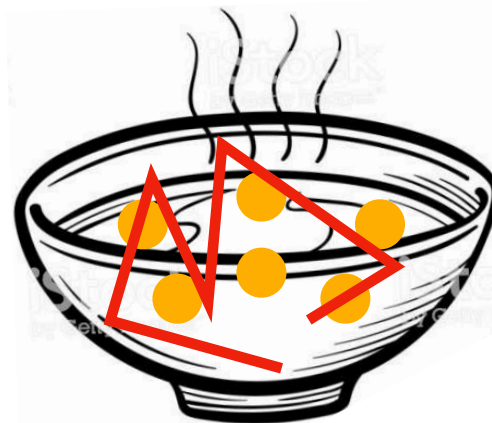
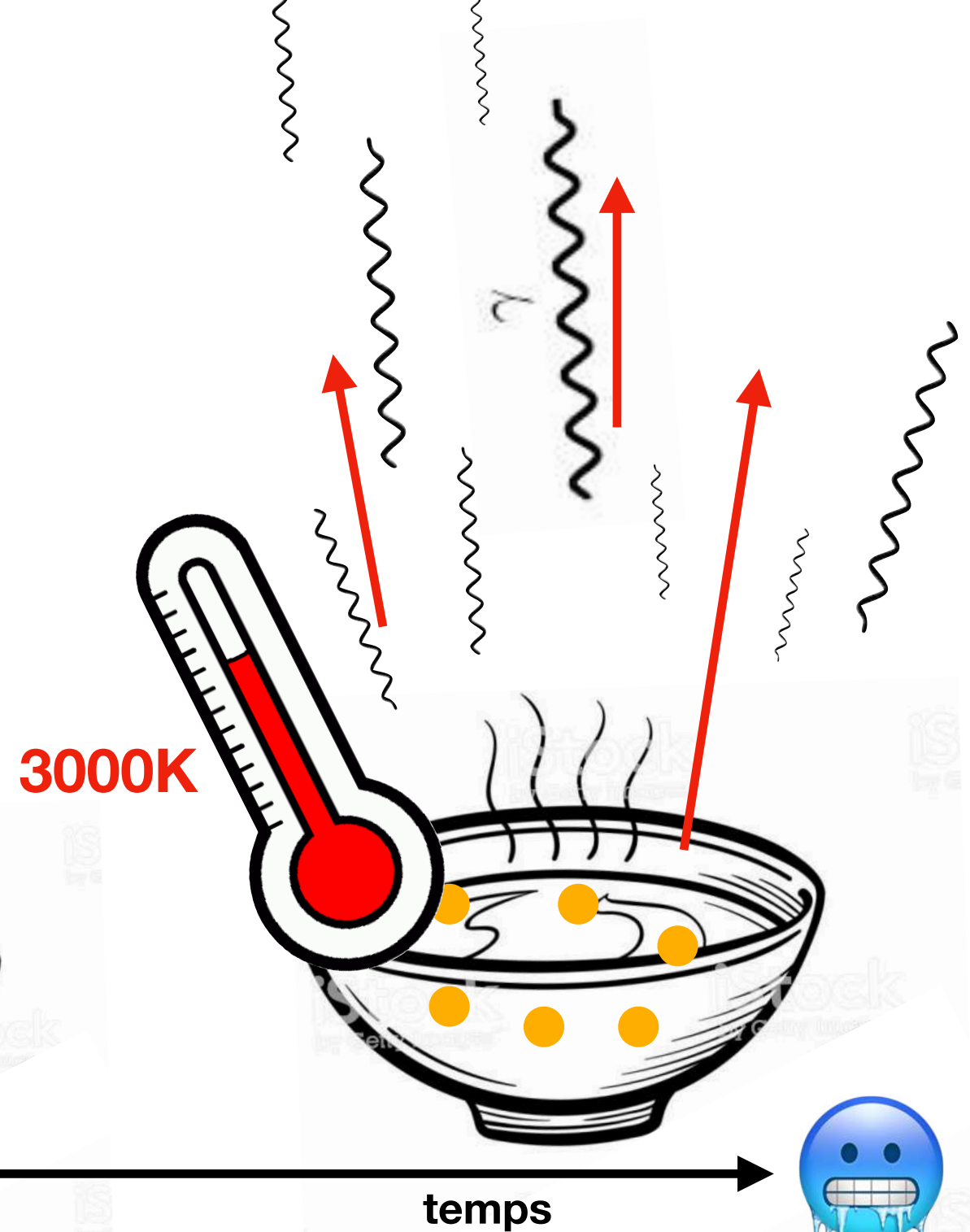
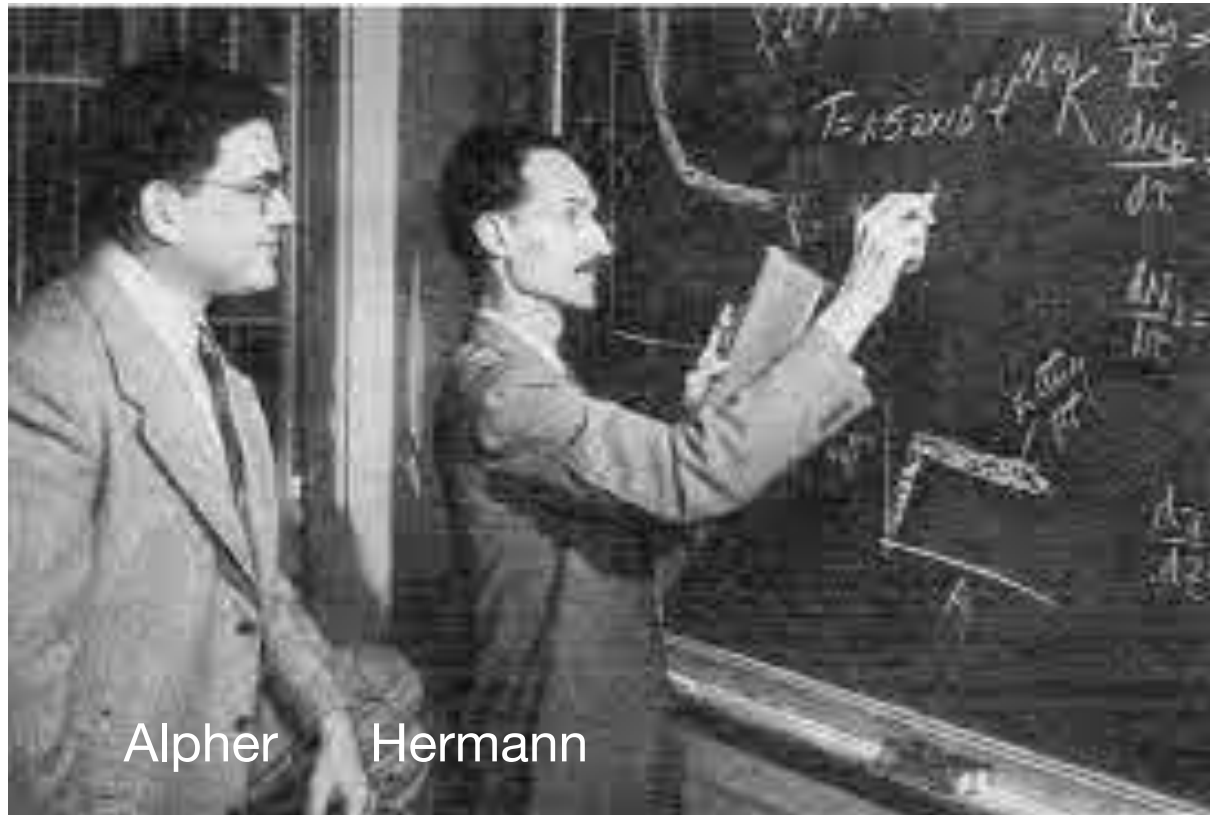
Loi de Hubble-Lemaître

expansion
de l'espace-
temps

nucléosynthèse
primordiale

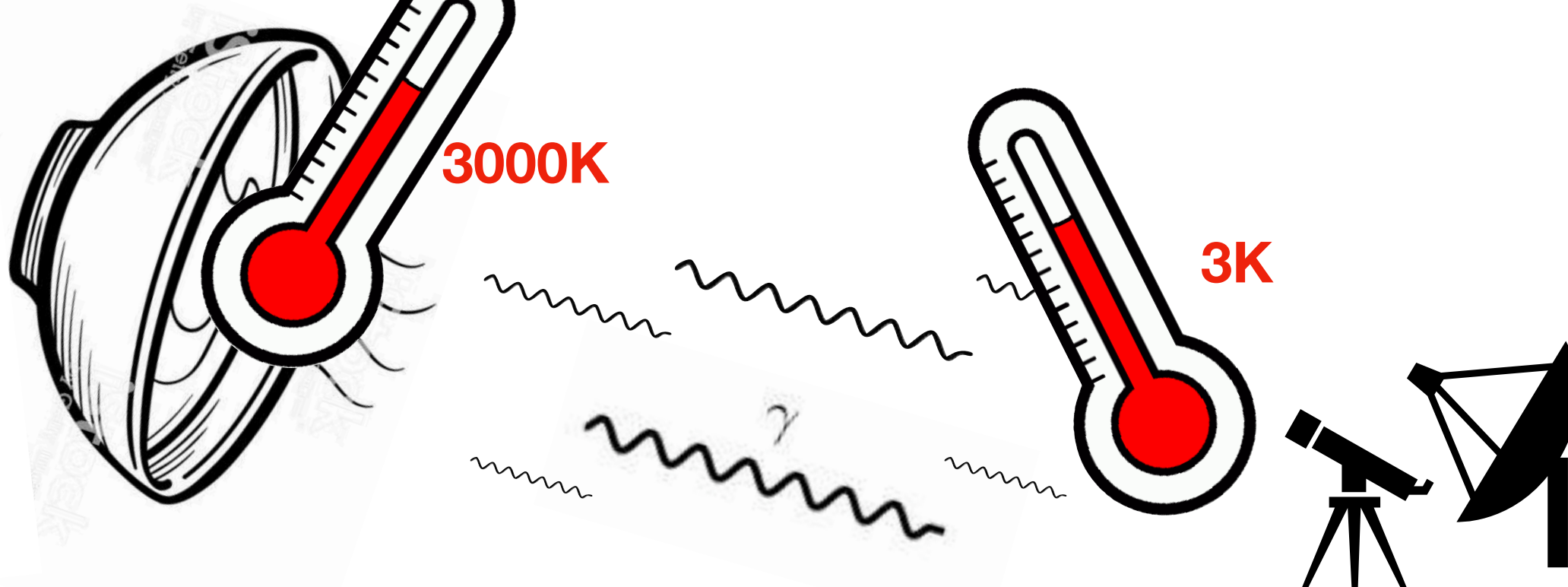


Gamow, Alpher, Hermann



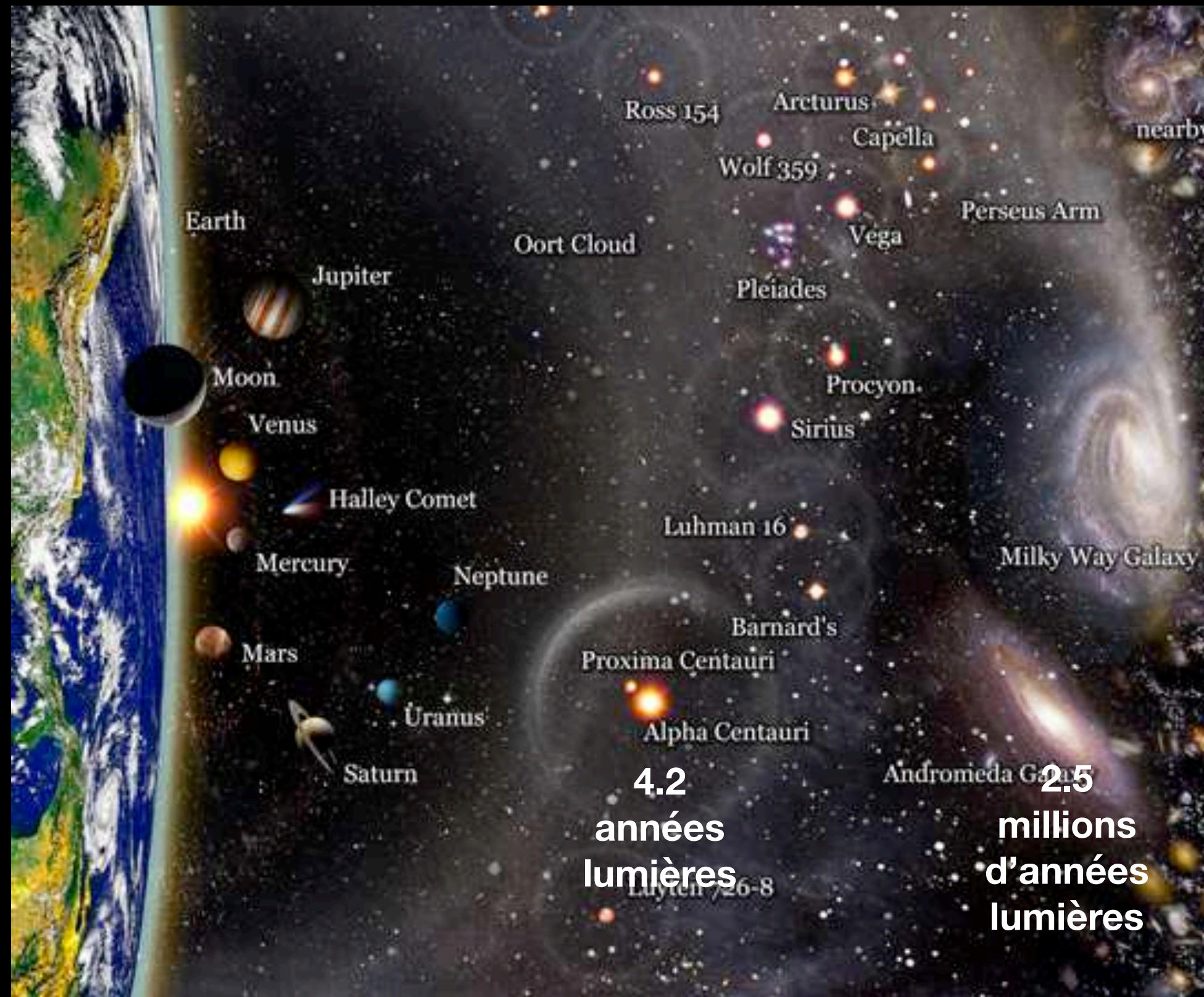
vers 377 000 ans, l'univers devient suffisamment froid pour que des atomes neutres se forment ("**recombinaison**") et, en conséquence, il devient également transparent pour la première fois.



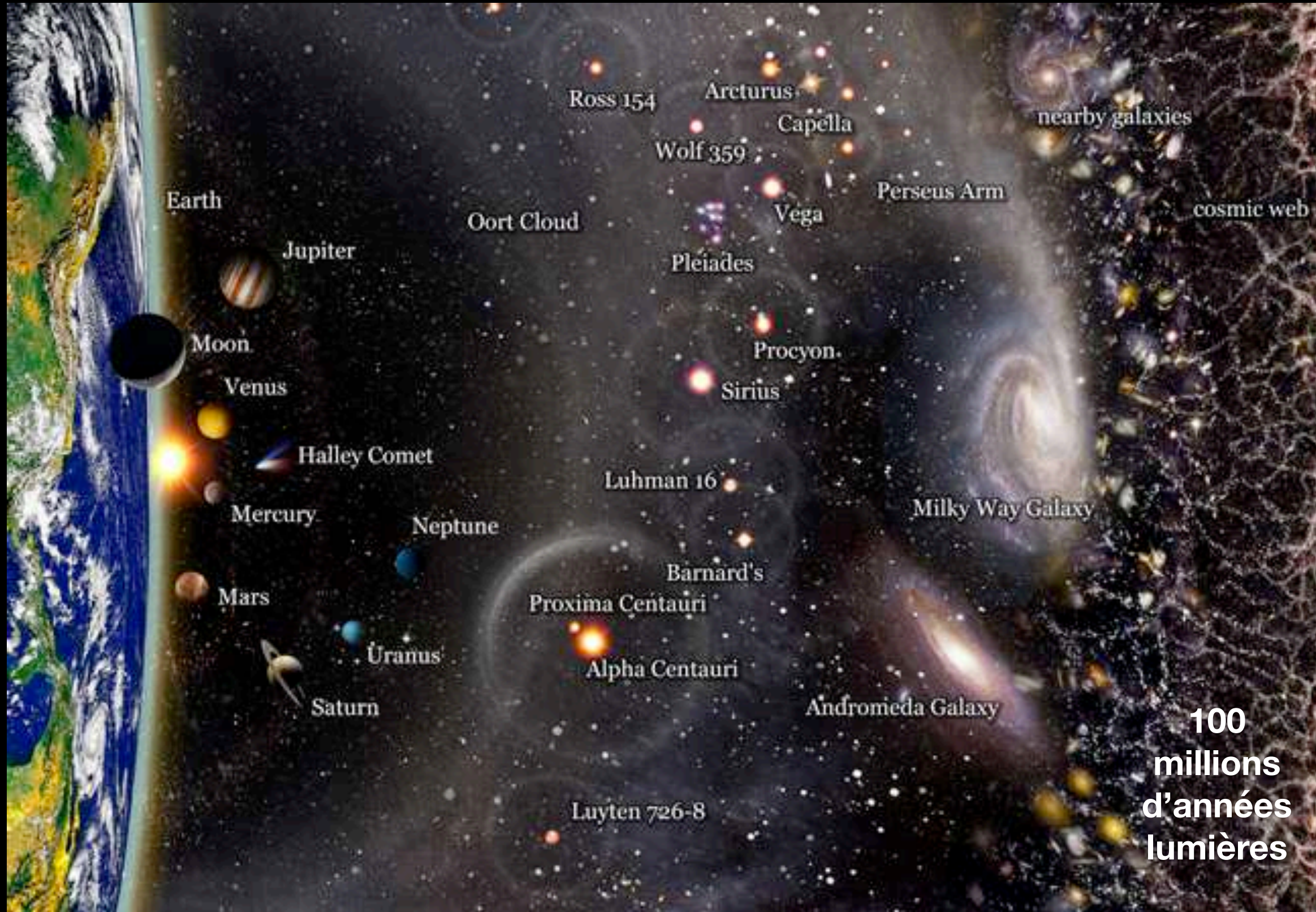


**le bol de soupe
primordiale devrait nous
apparaître sous la forme d'un
rayonnement à quelques
degrés au-dessus du zéro
absolu**

une autre façon de voir ce “rayonnement fossile”



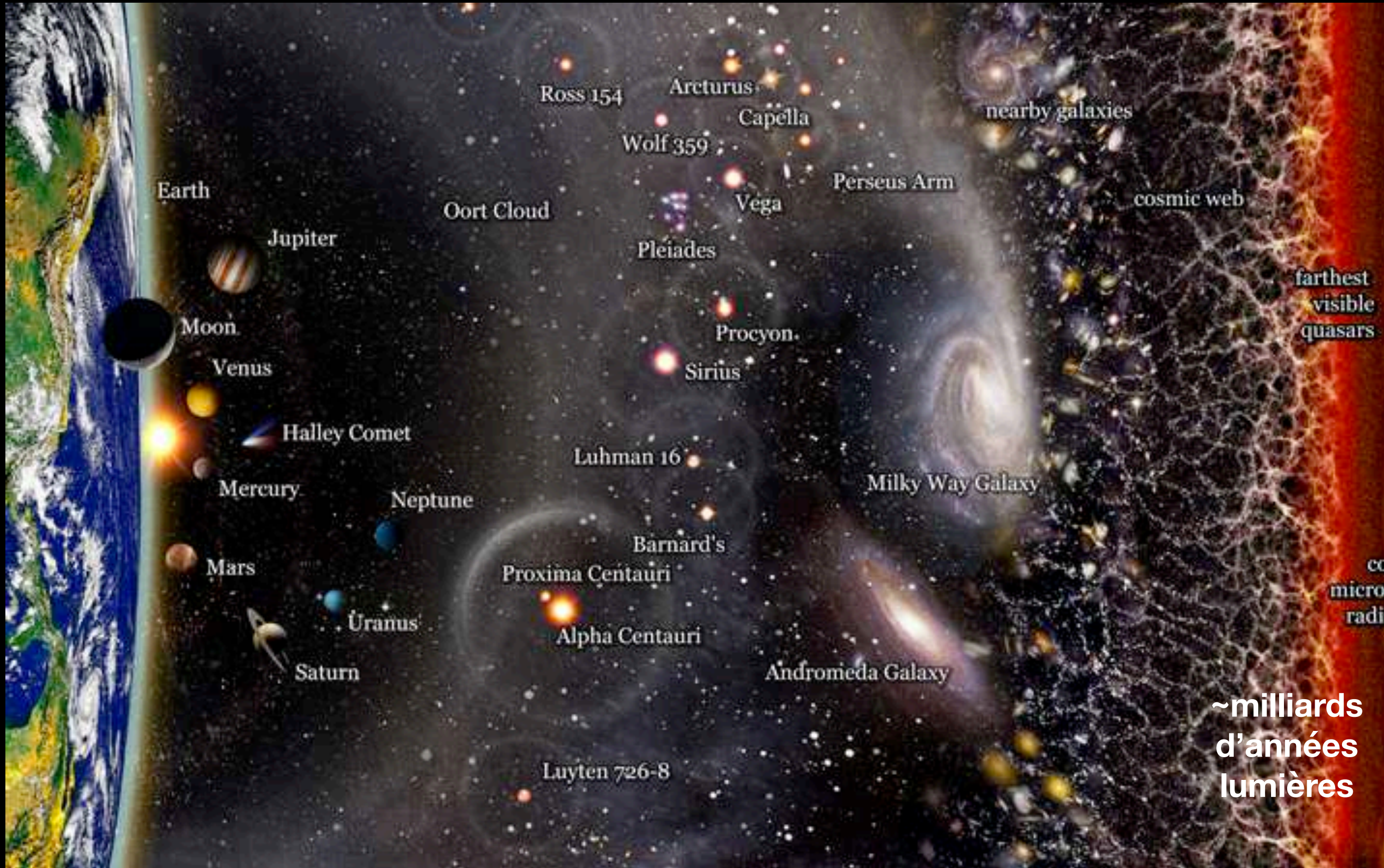
L'Univers à 2 dimensions



100
millions
d'années
lumières

distance = temps

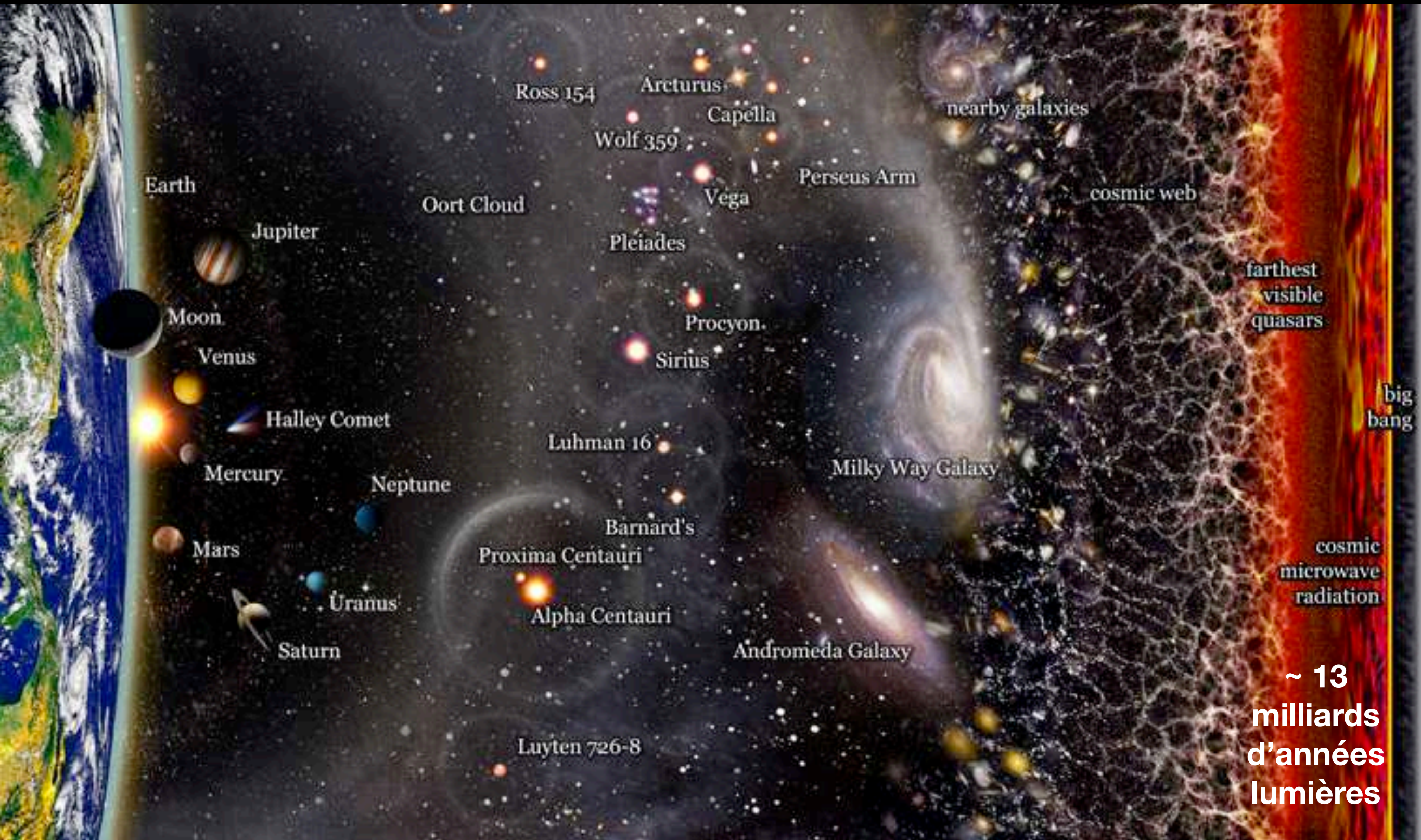
l'Univers à 2 dimensions



~milliards
d'années
lumière

distance = temps

l'Univers à 2 dimensions



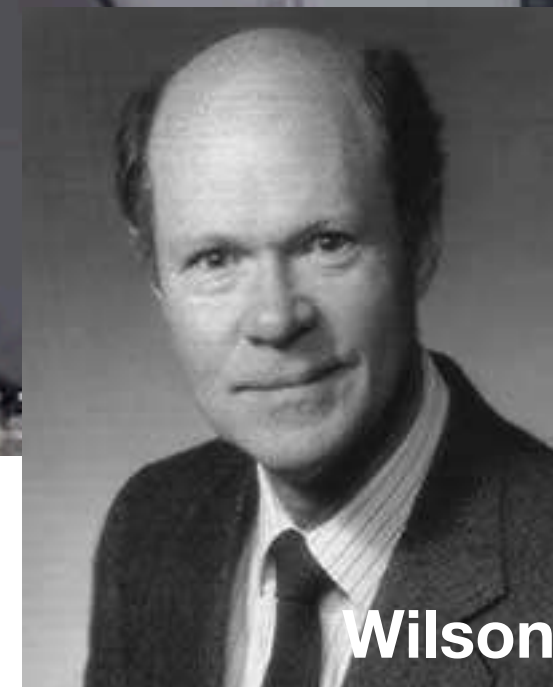
distance = temps



1964-65



Penzias



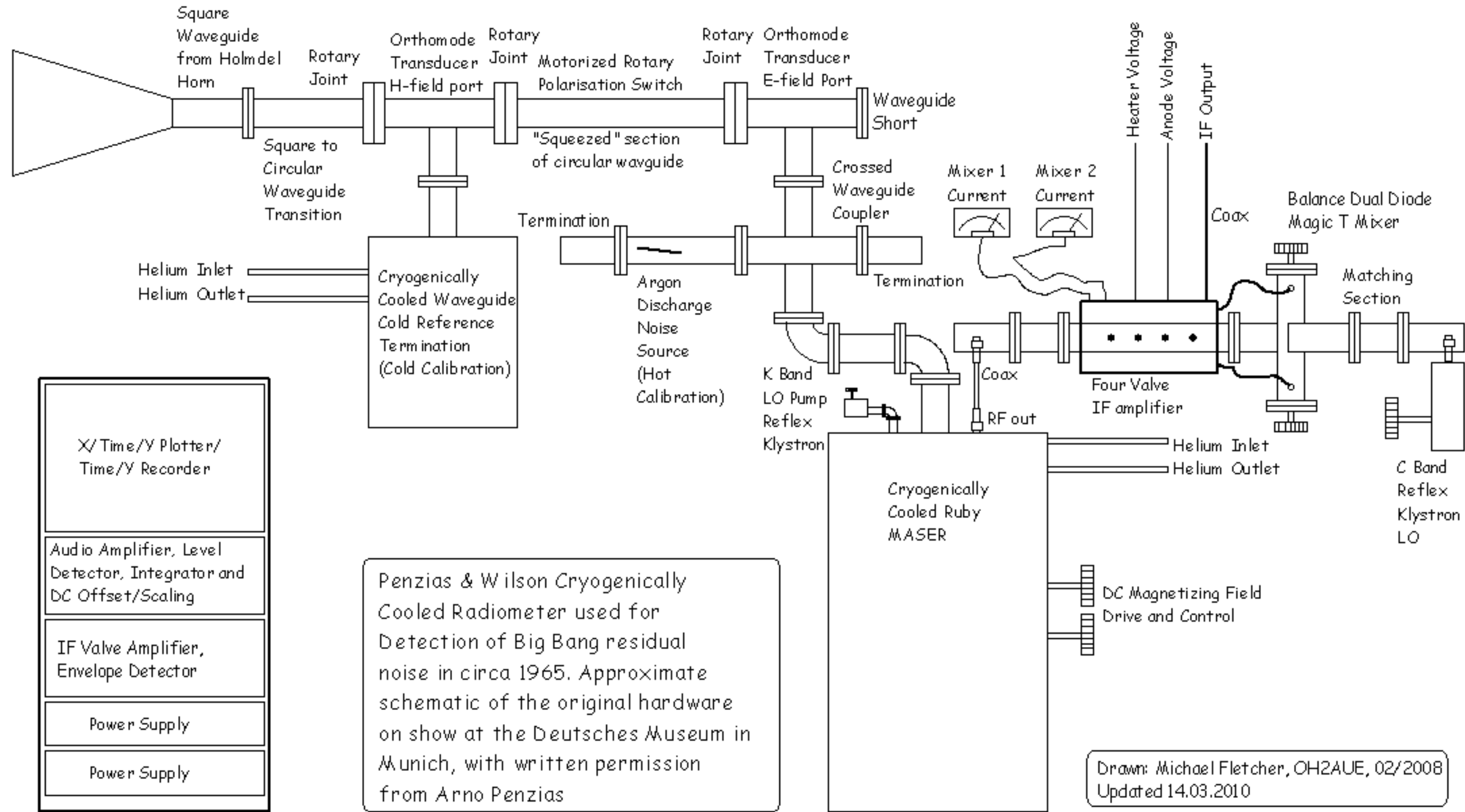
Wilson

Penzias & Wilson / Bell Labs Receiver at Deutsches Museum

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

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





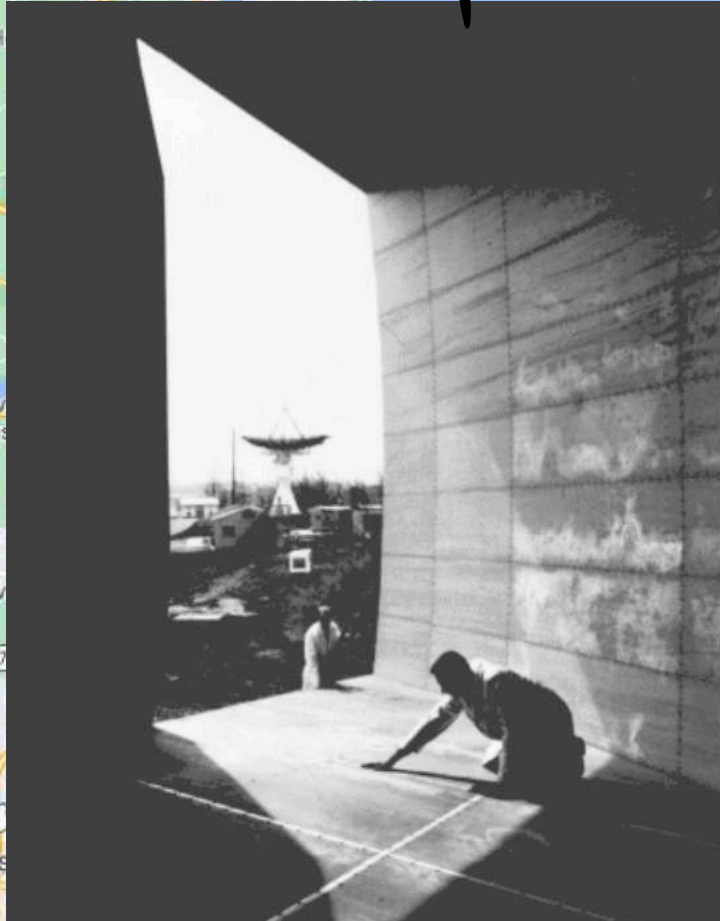
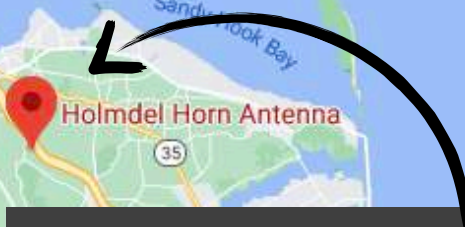
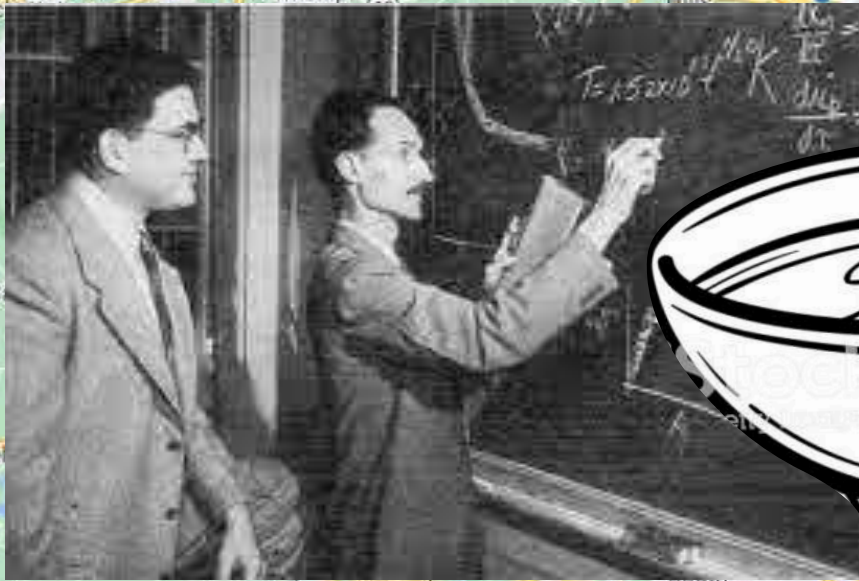
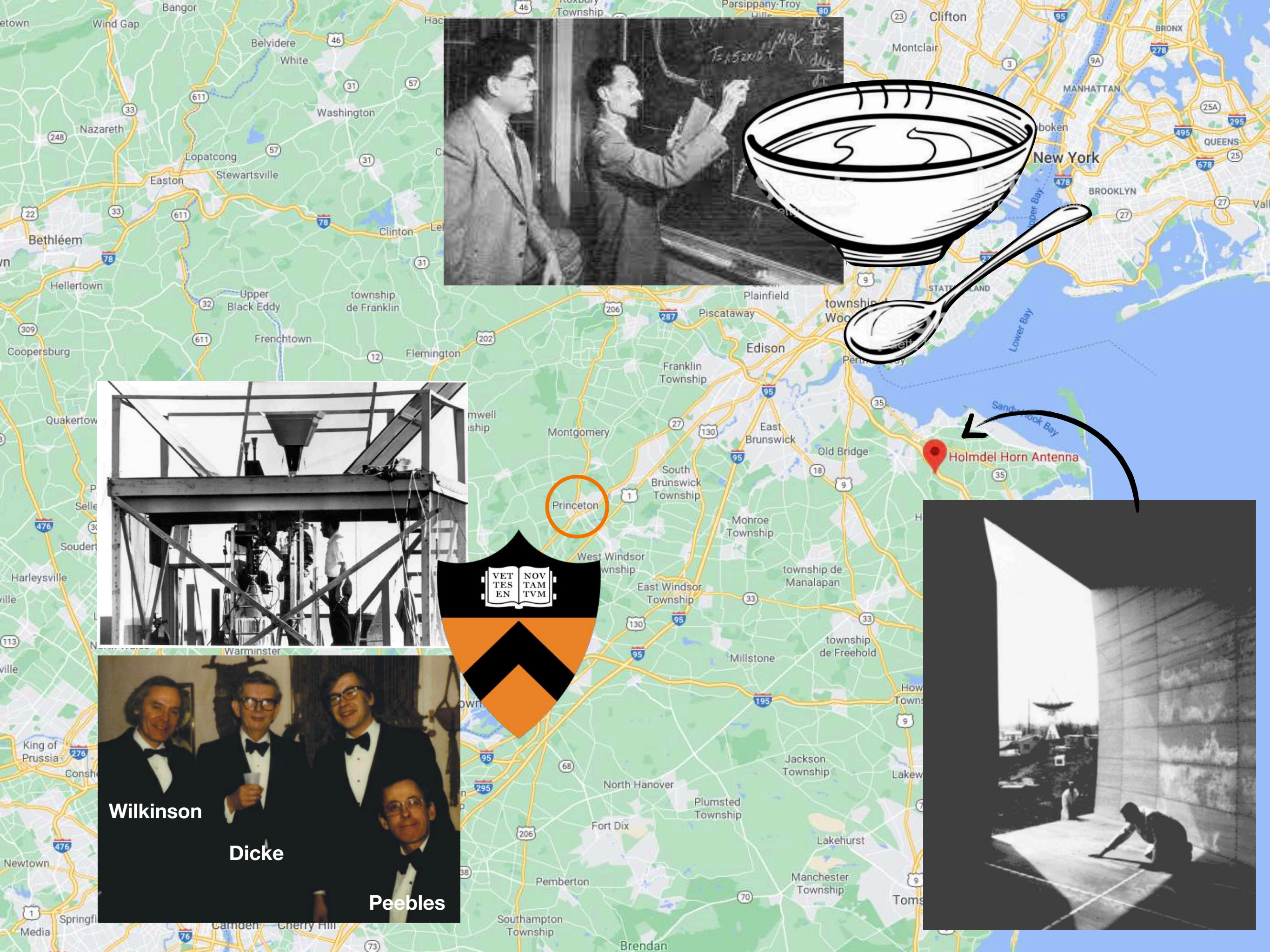


**View from inside the 20-foot Holmdel horn
Cleaning the antenna**



le ciel n'est pas noir!





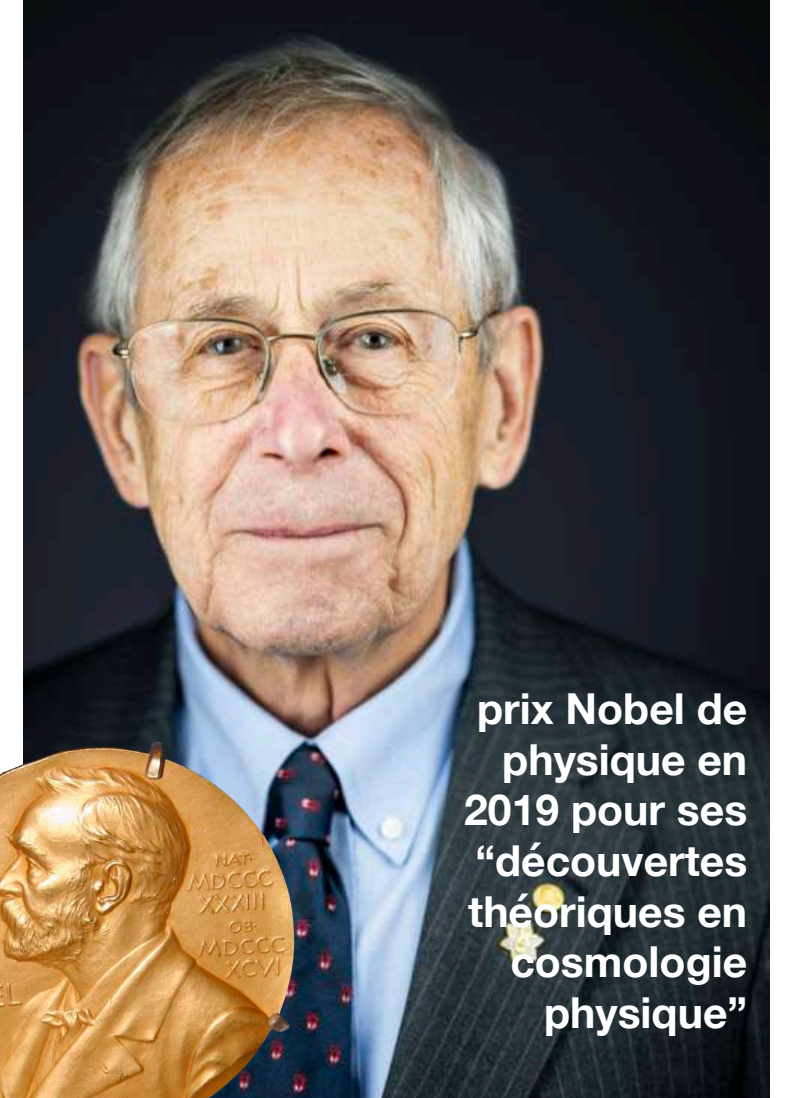
Late 1964 – Connection Made

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°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 3,5K”



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



Wilkinson

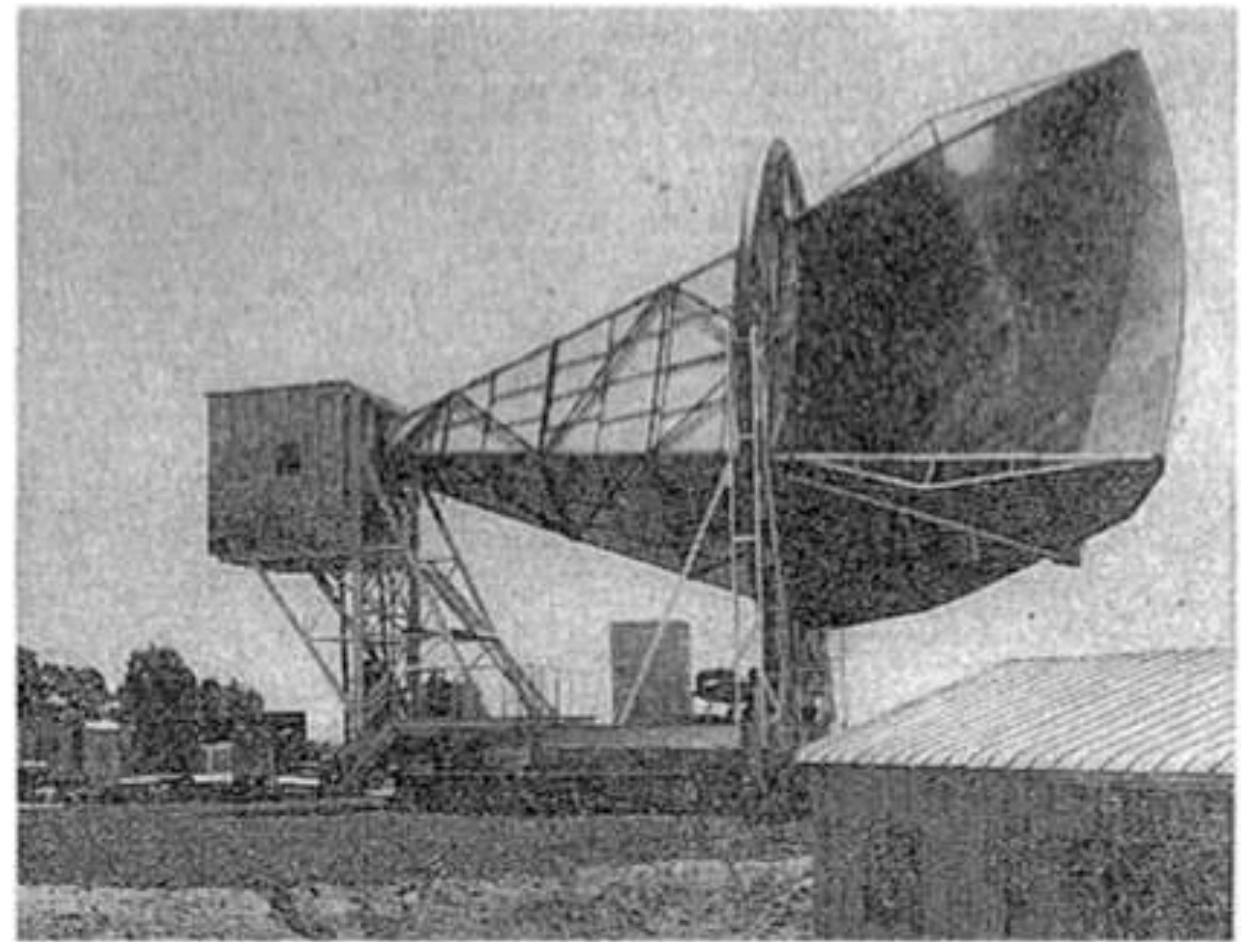
Dicke

Peebles

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

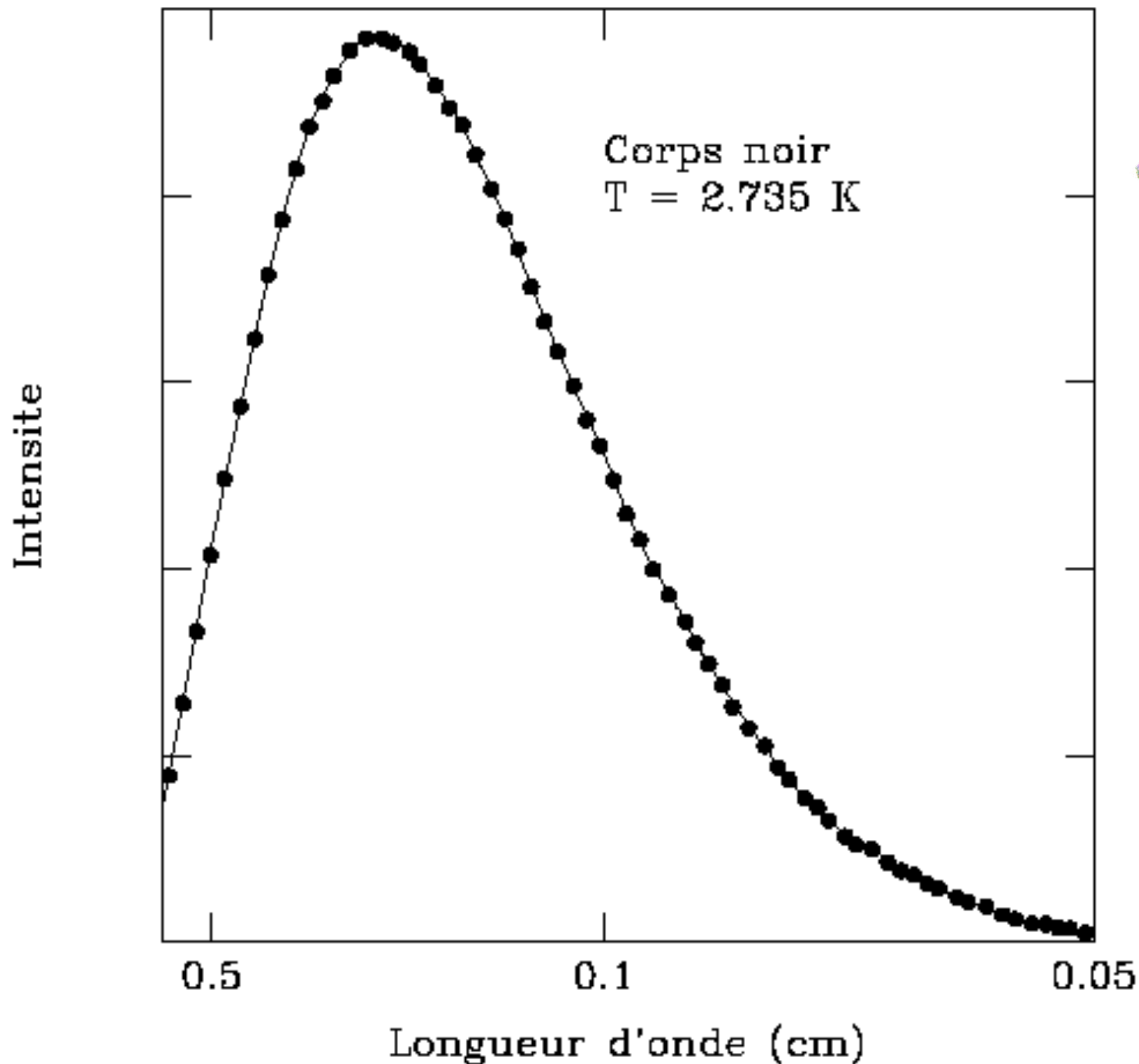
The New York Times

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

A la suite de Penzias & Wilson

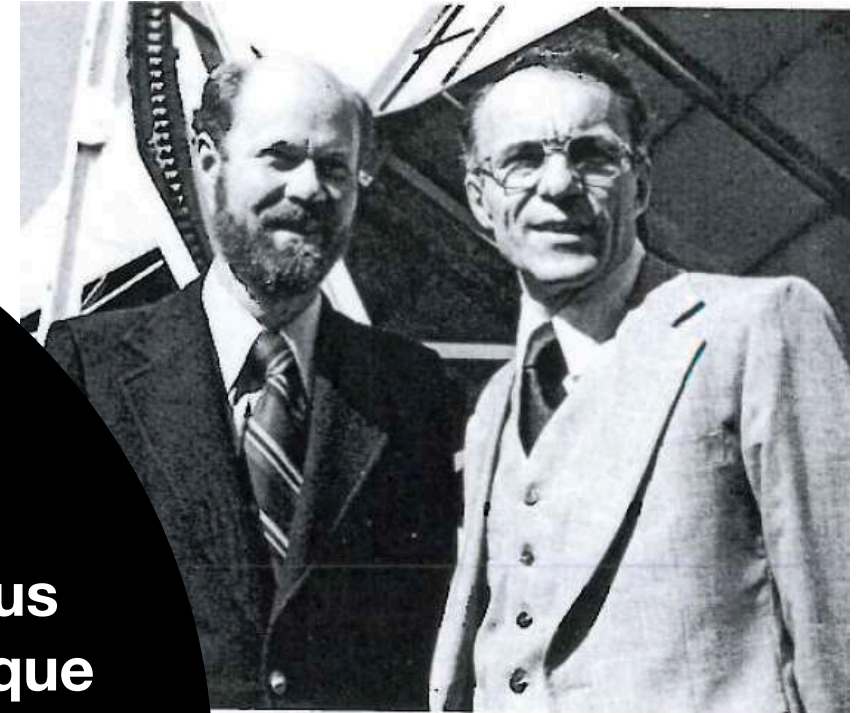
COBE : la mesure du spectre d'émission et des anisotropies du rayonnement fossile

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



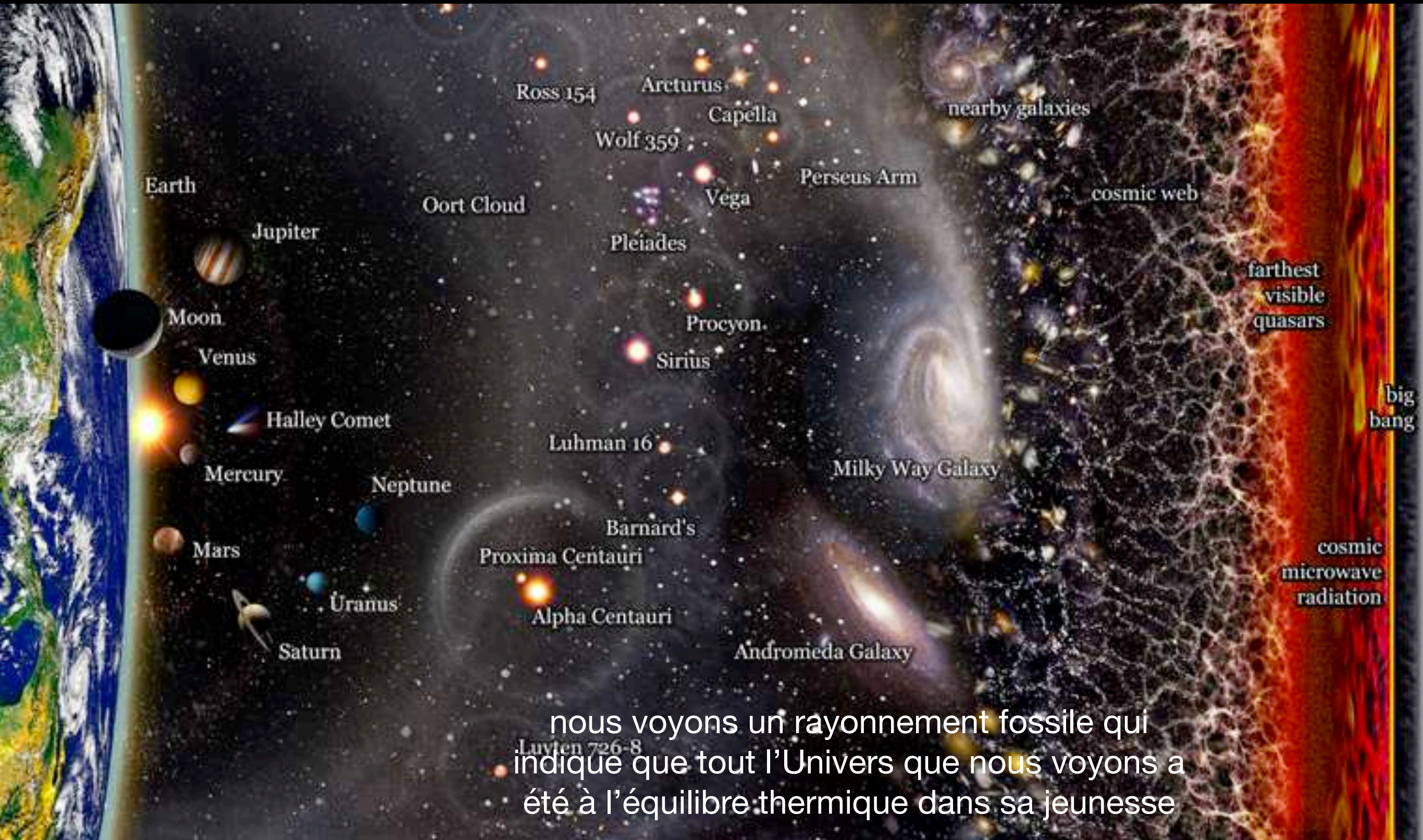
Loi de Hubble-Lemaître

Penzias et Wilson



Gamow, Alpher, Hermann

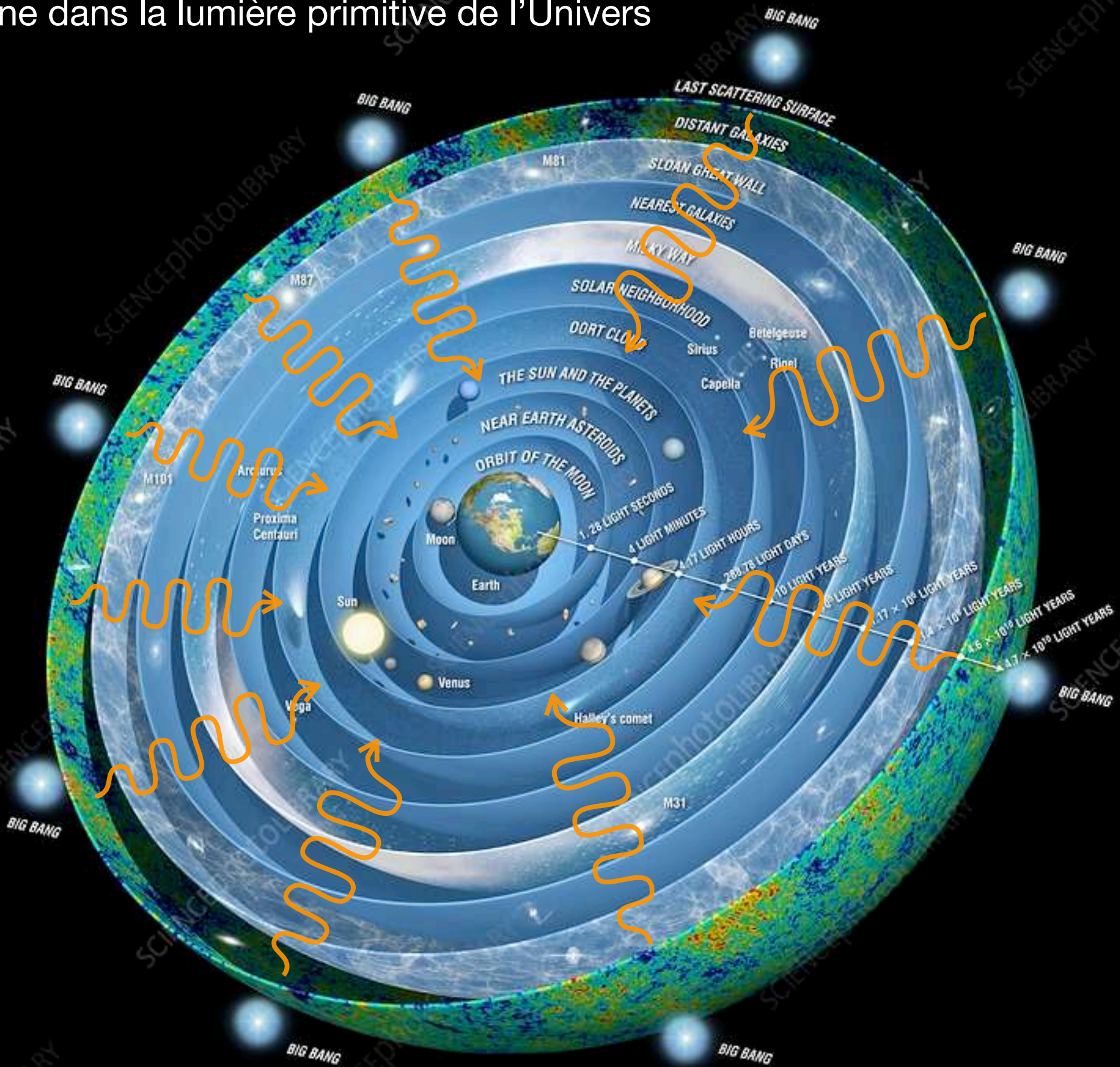
l'Univers à 2 dimensions



nous voyons un rayonnement fossile qui indique que tout l'Univers que nous voyons a été à l'équilibre thermique dans sa jeunesse

distance = temps

la Terre baigne dans la lumière primitive de l'Univers



2

3

4

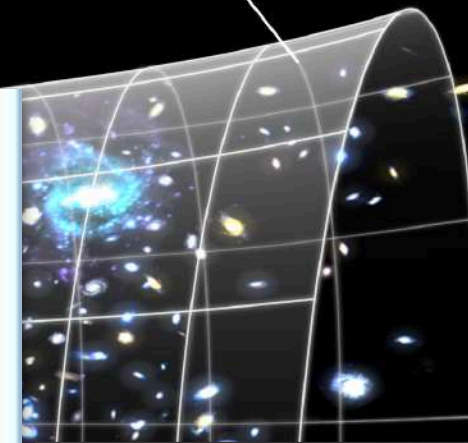
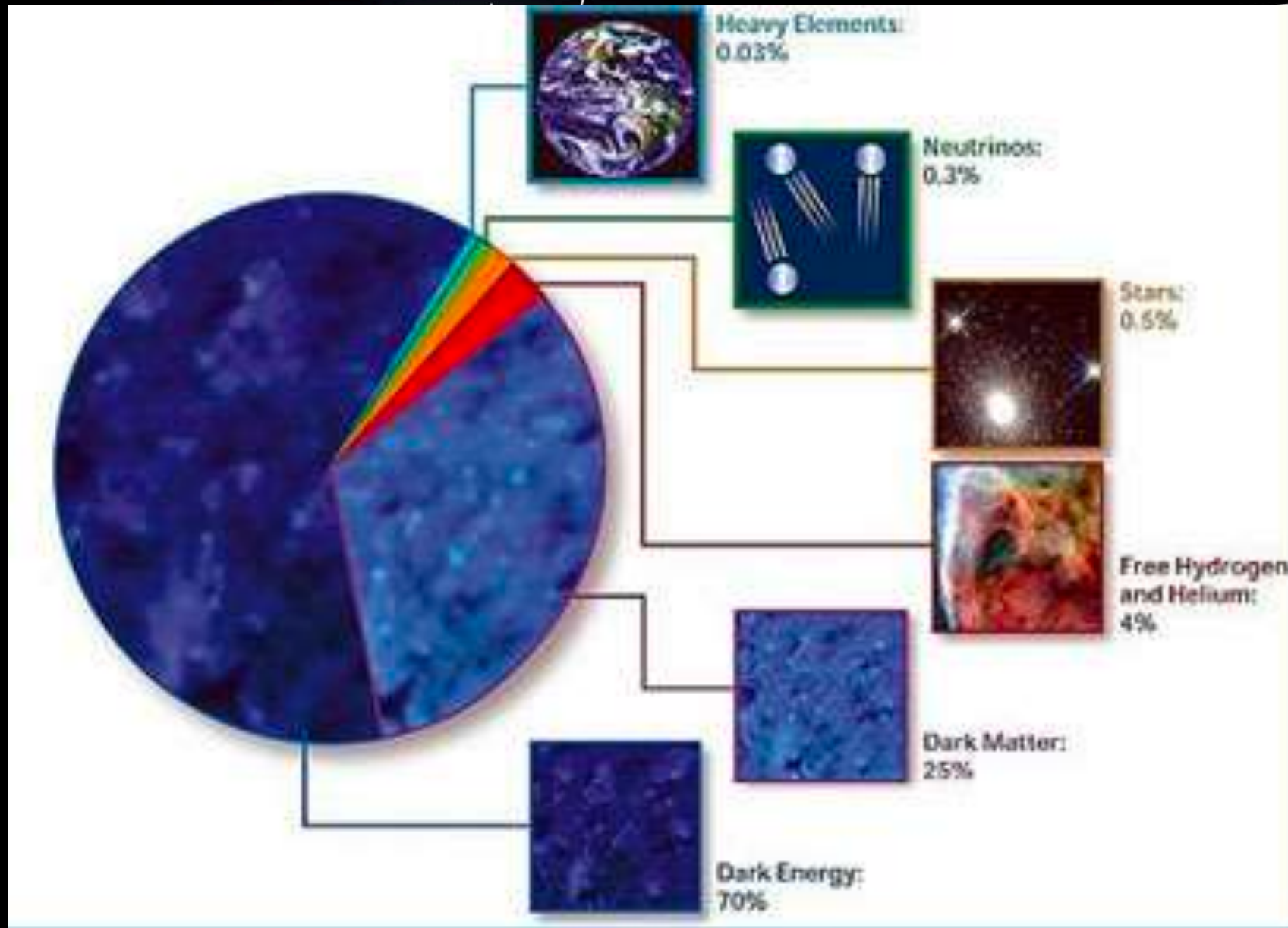
5

Afterglow Light Pattern
375,000 yrs.

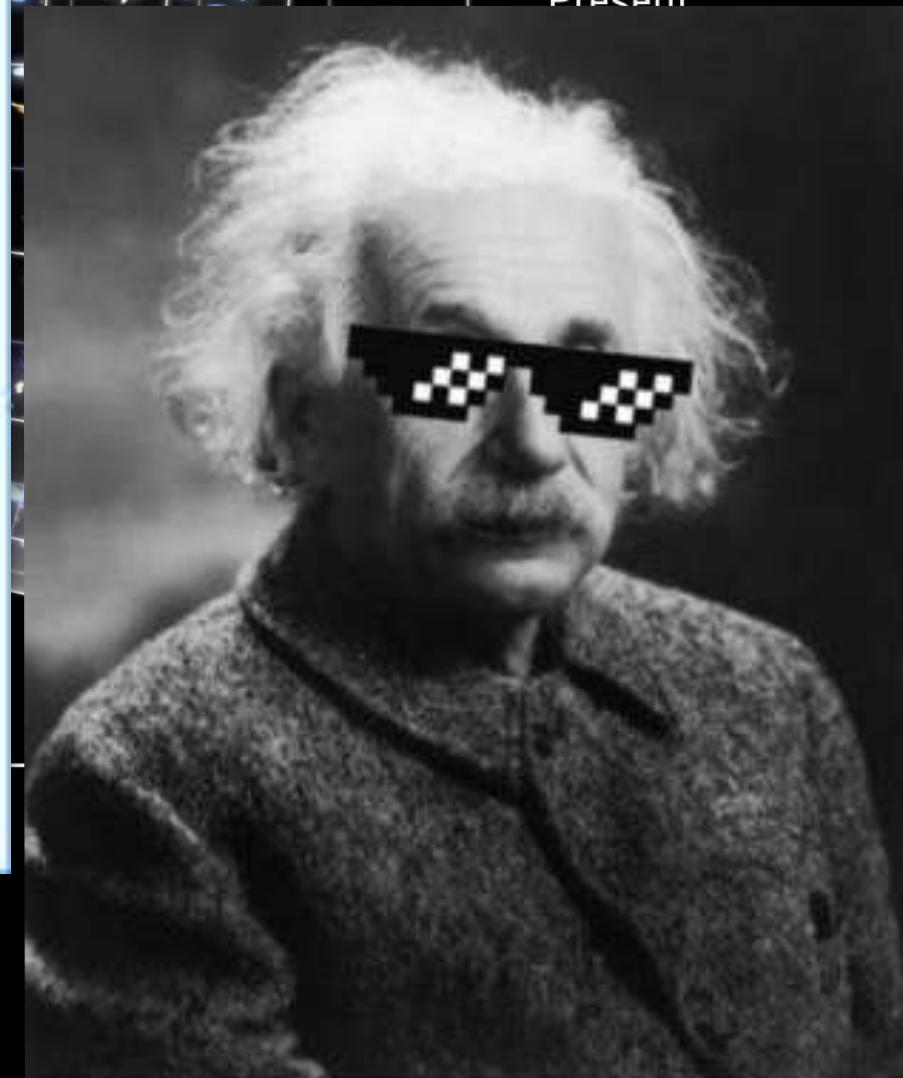
Dark Ages

Development of
Galaxies, Planets, etc.

Dark Energy
Accelerated Expansion



Present



seulement 6 paramètres libres dans le modèle !

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.”

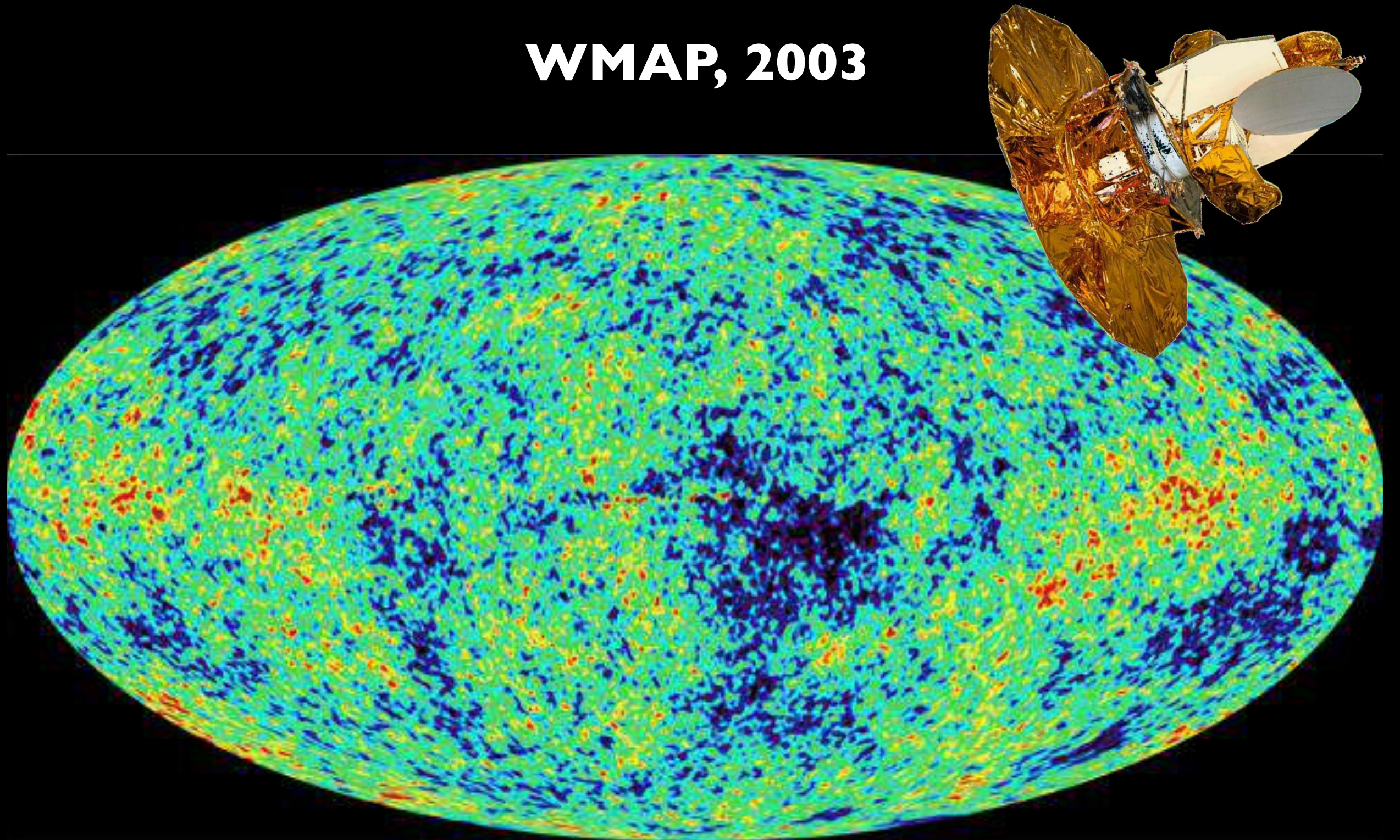


Troisième chapitre de cette conférence : voyage vers l'instant "zero" et inflation cosmique

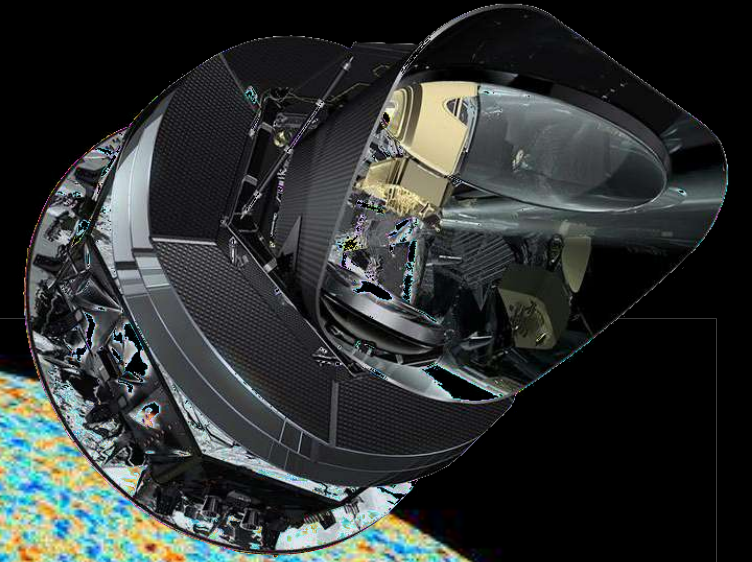
COBE, 1992



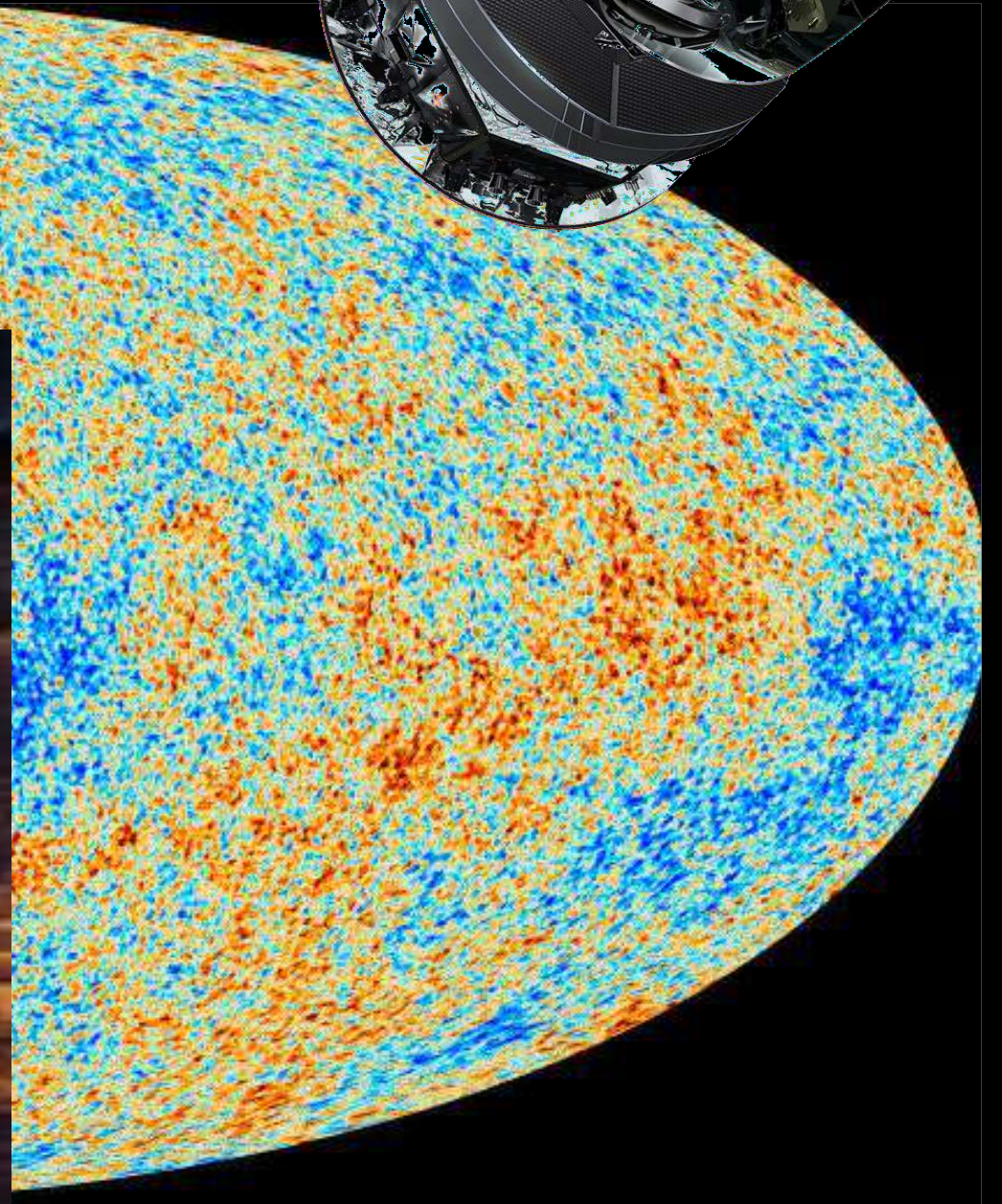
WMAP, 2003



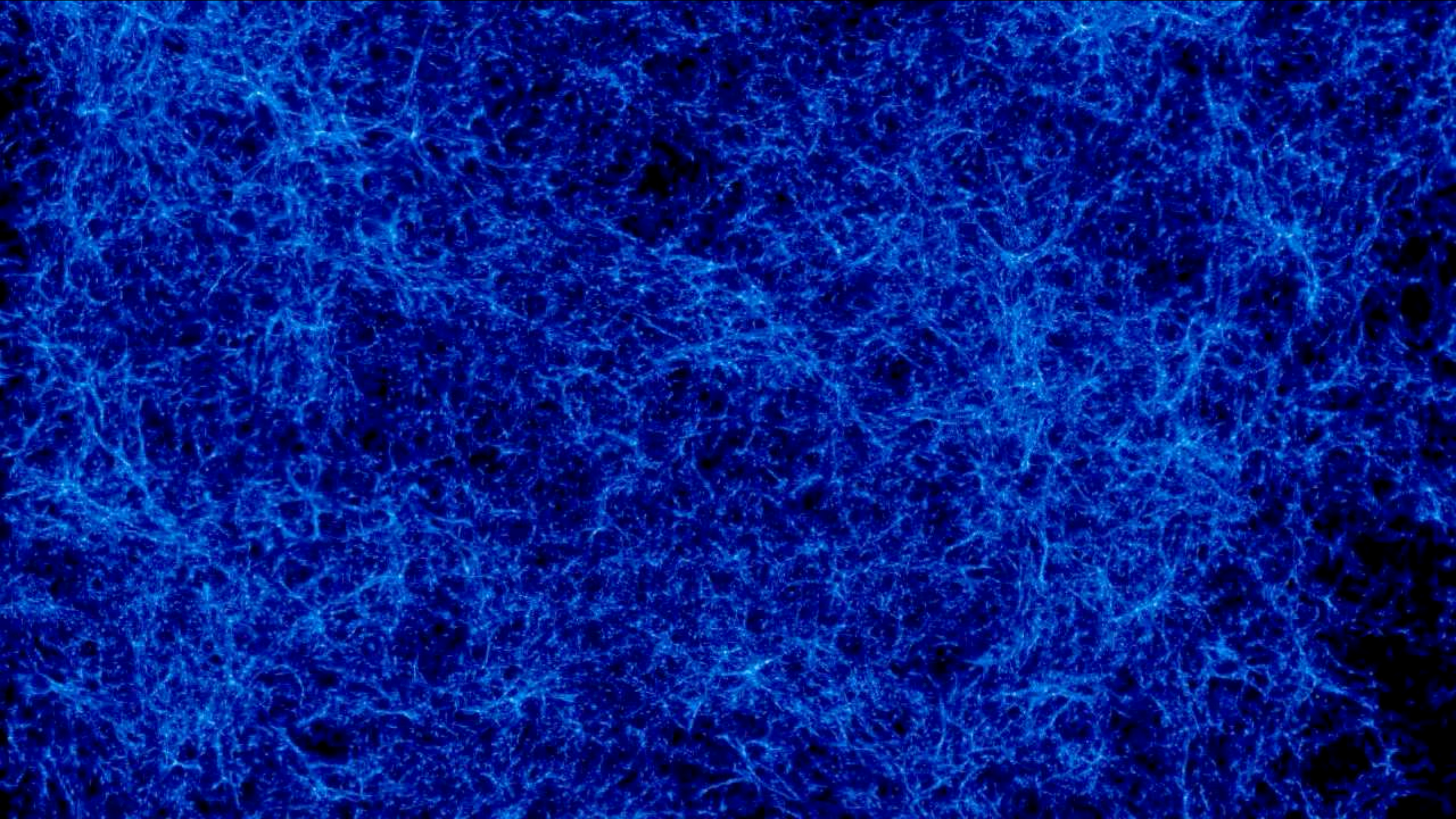
Planck, 2018



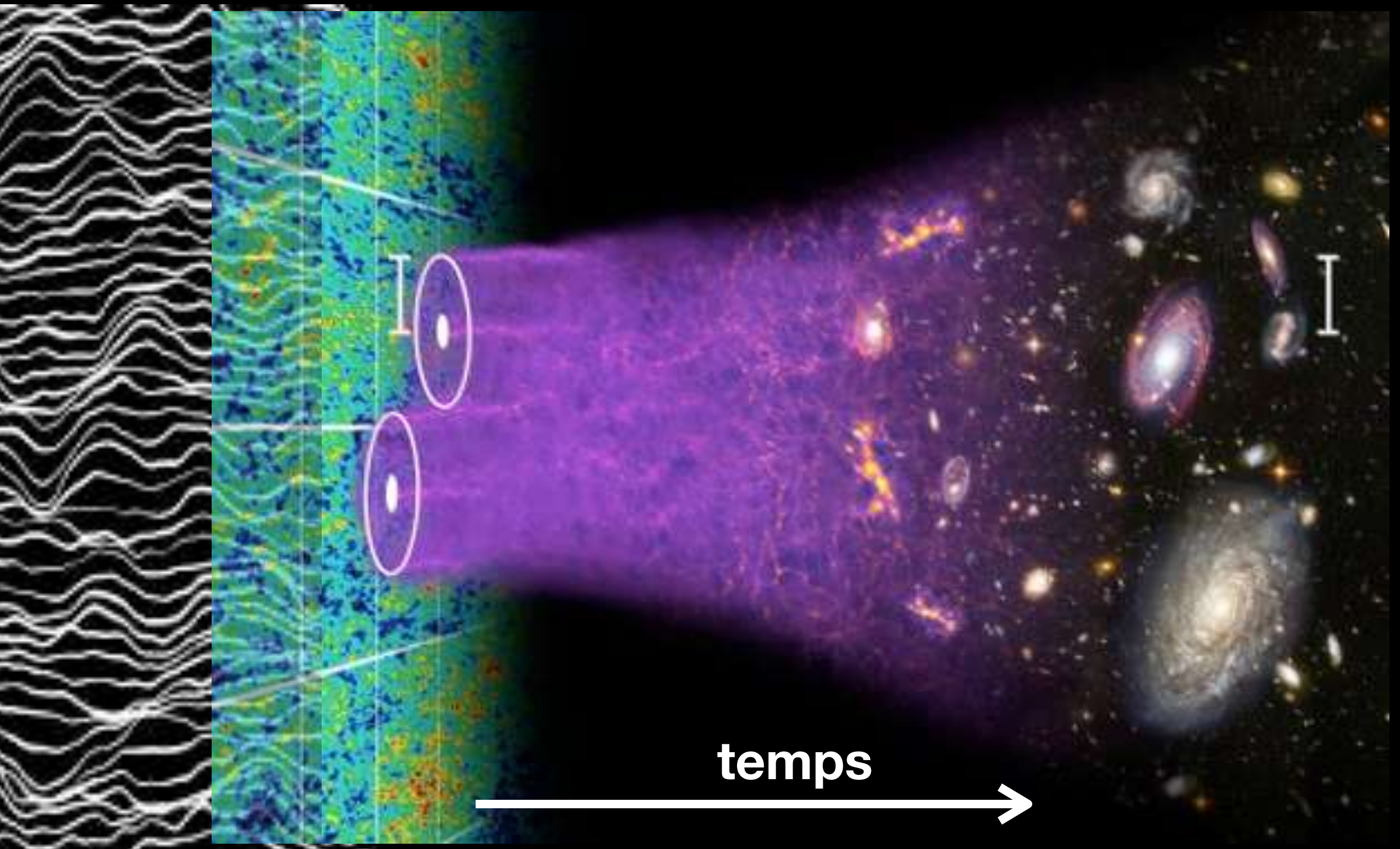
soupe primordiale très homogène mais avec quelques grumeaux



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



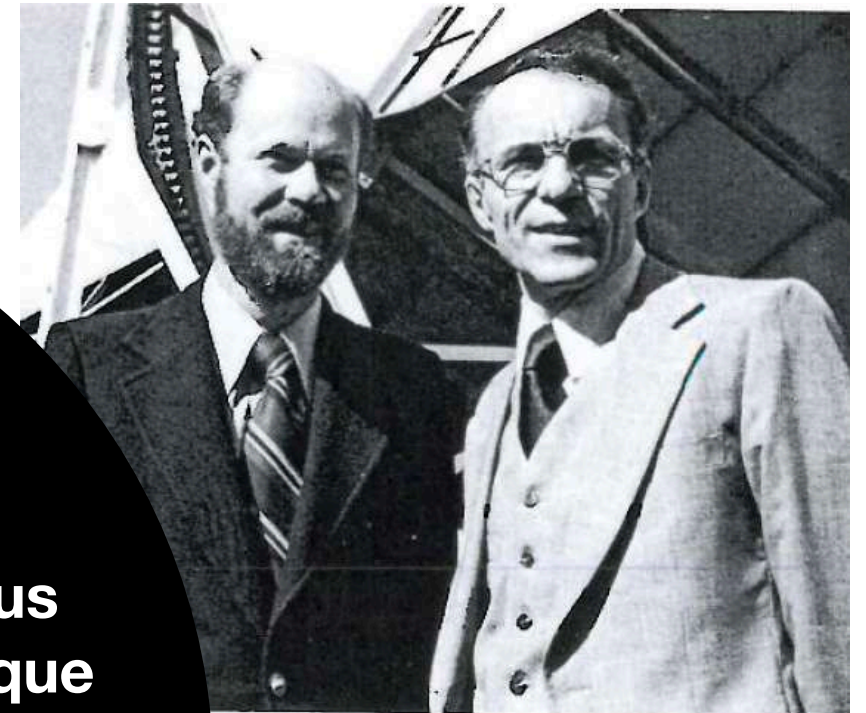
oscillations acoustiques dans le plasma primordial



la théorie du Big Bang



Loi de Hubble-Lemaître



Penzias et Wilson

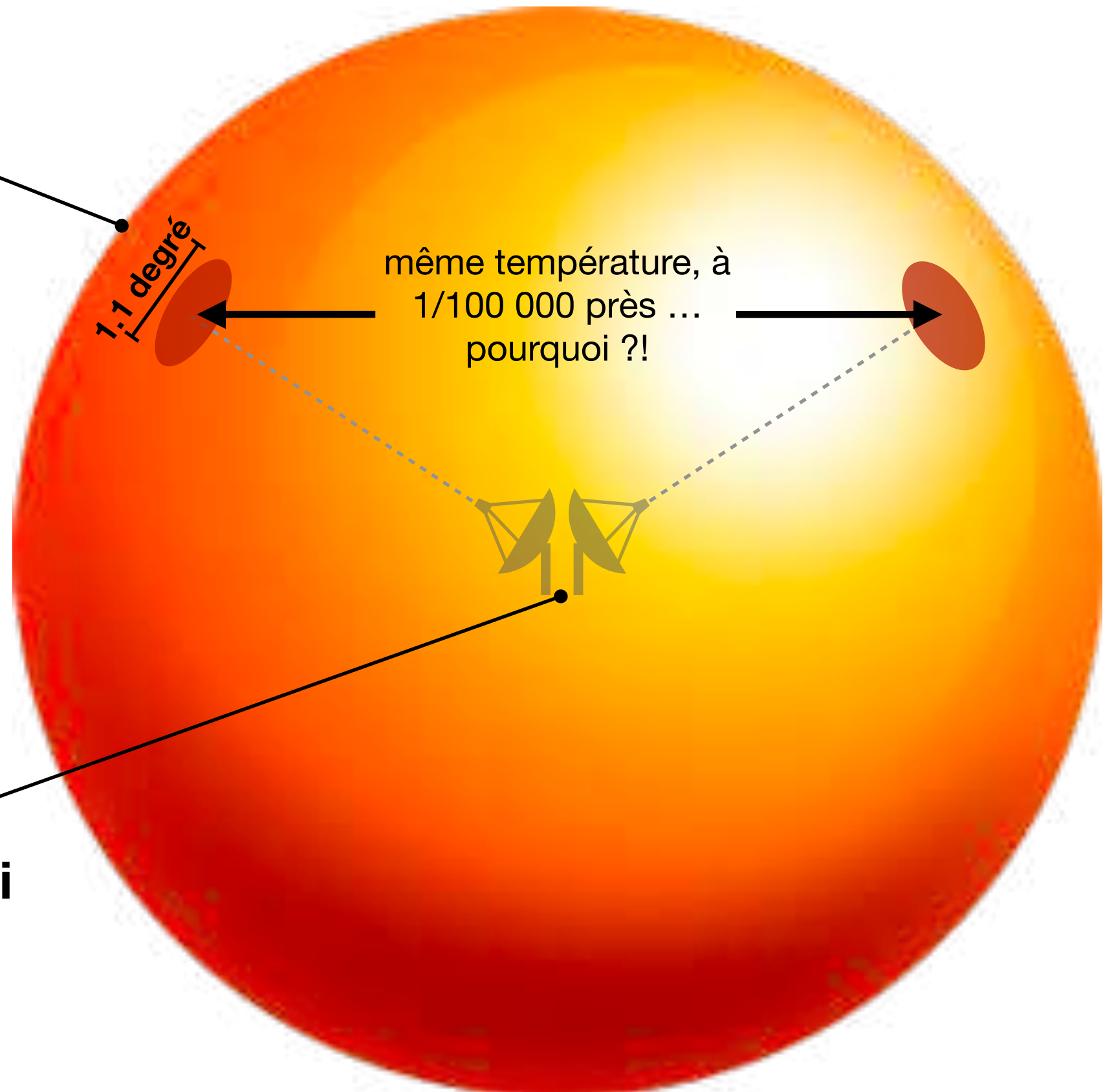


Gamow, Alpher, Hermann

Le problème de l'horizon

le fond diffus cosmologique,
isotrope et homogène

nous,
aujourd'hui

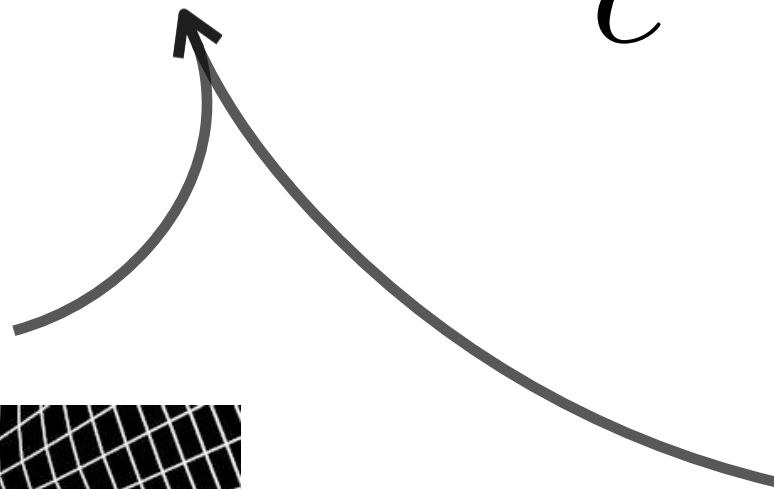




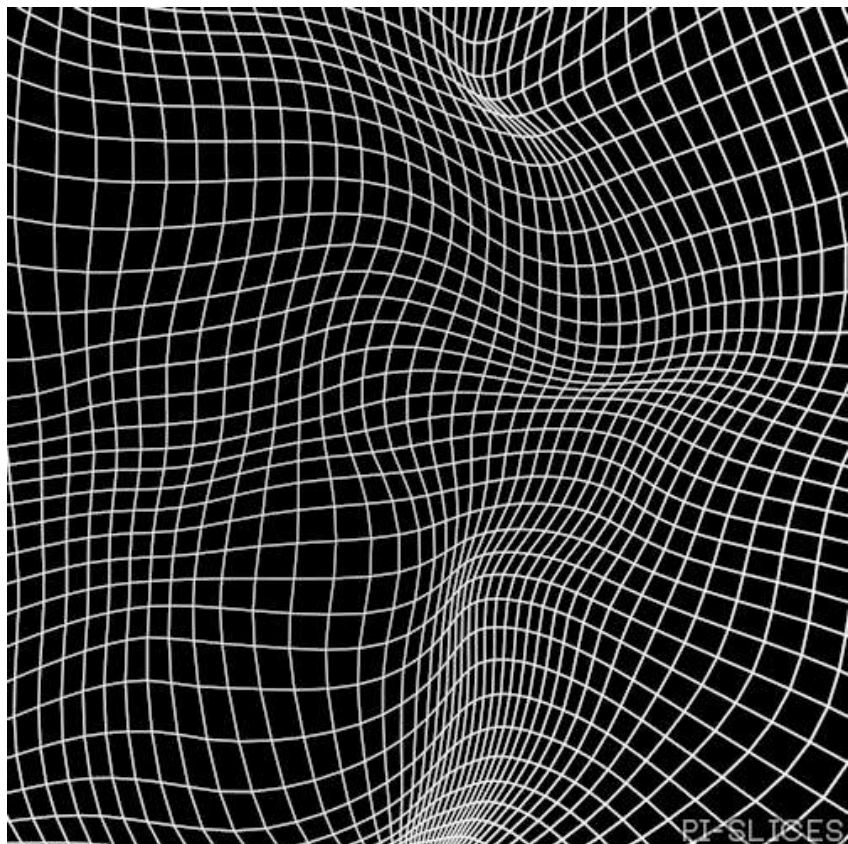
J. Errard, Rencontres de Physique Été 2023

Le problème de la platitude

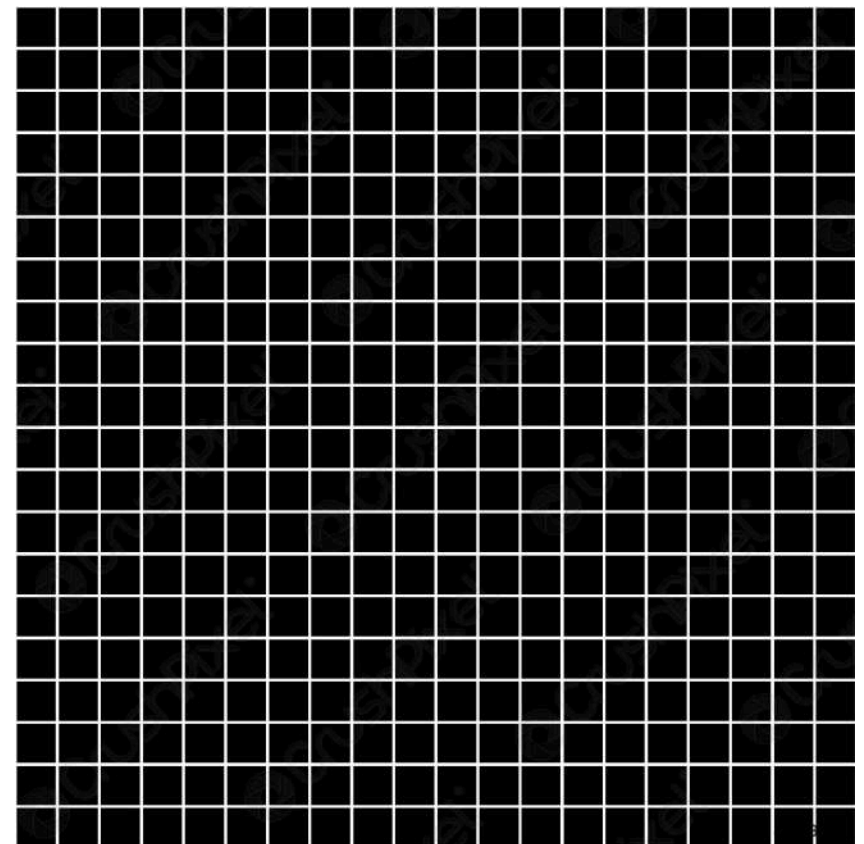
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



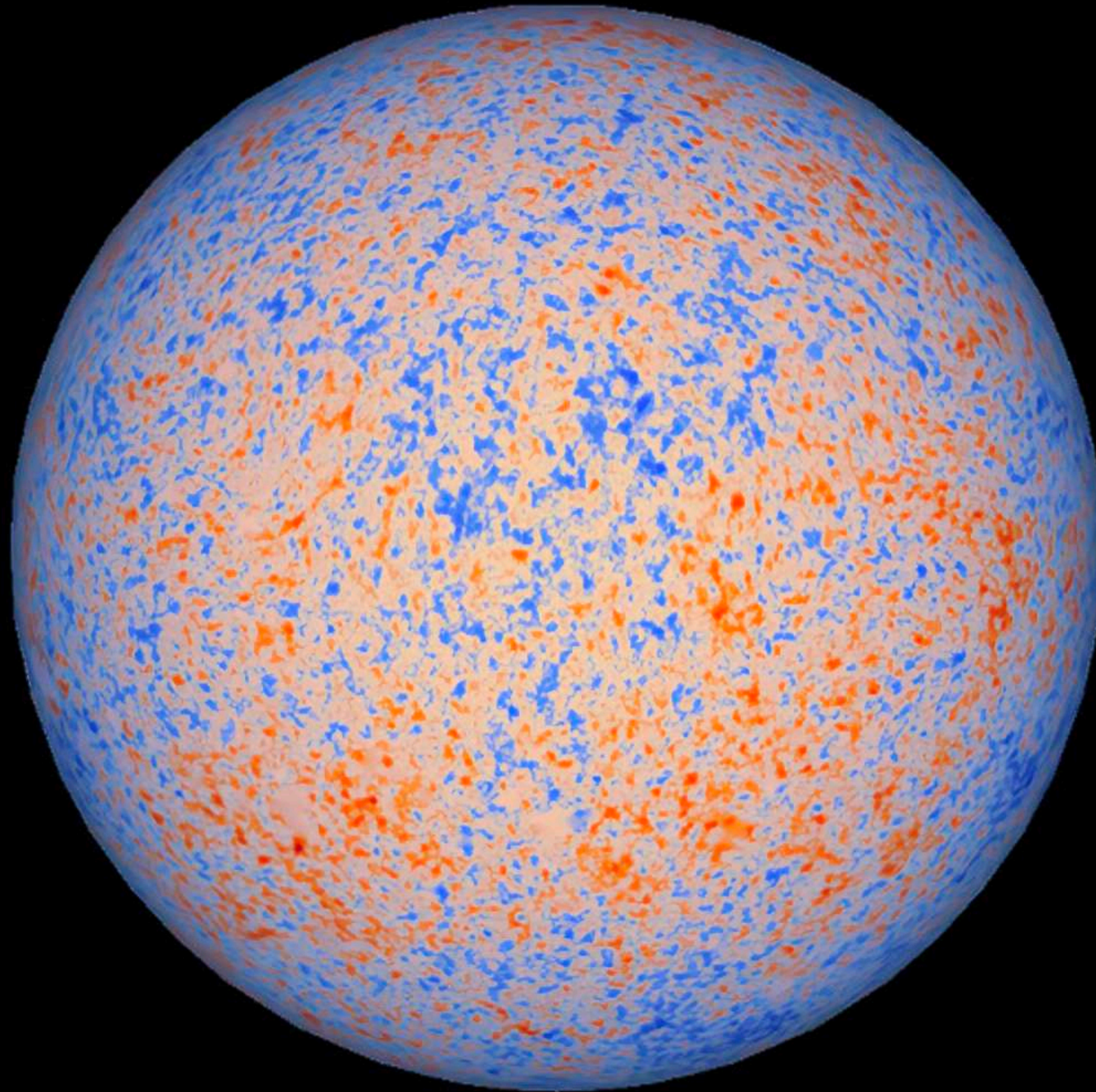
l'espace plat observé

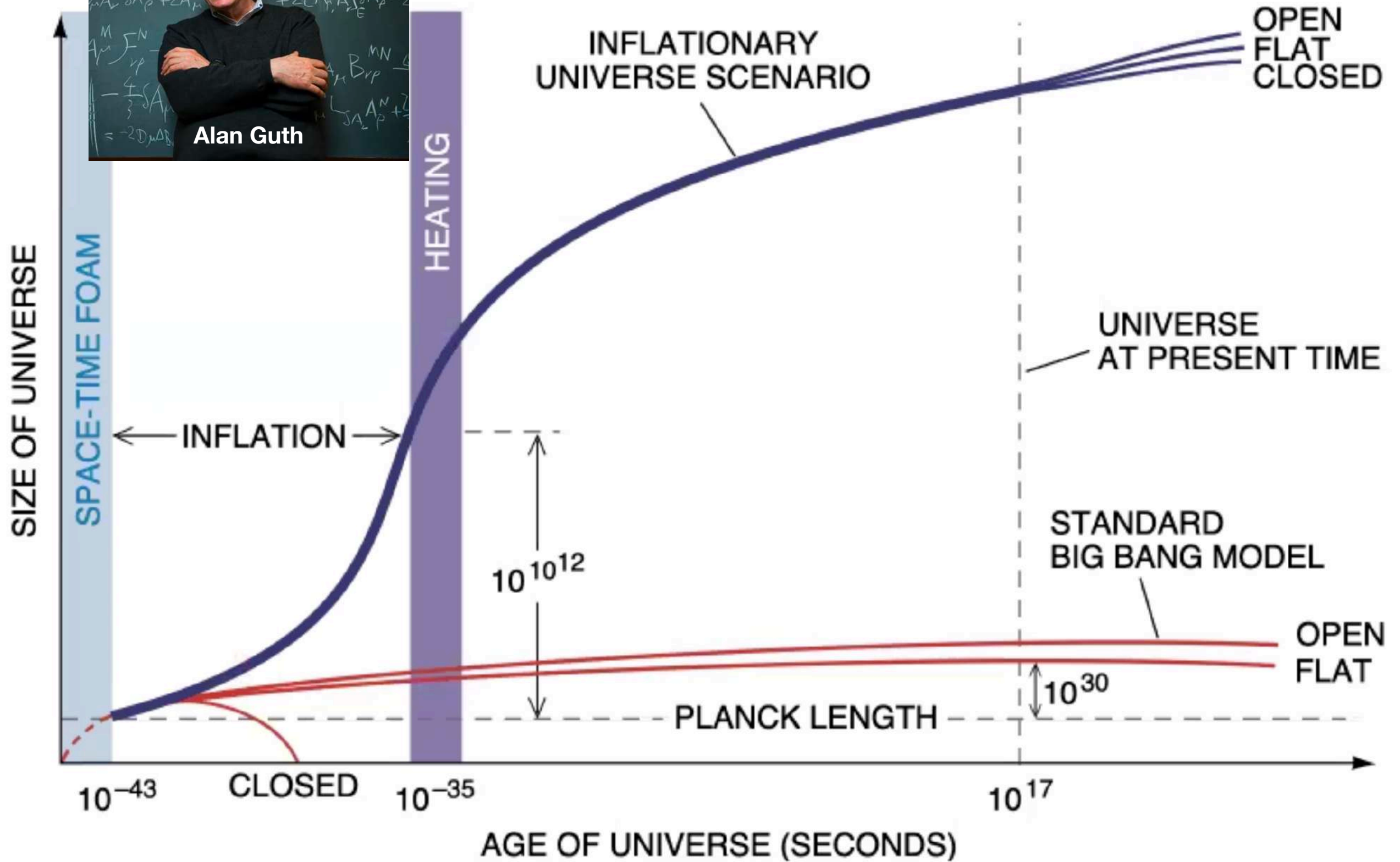
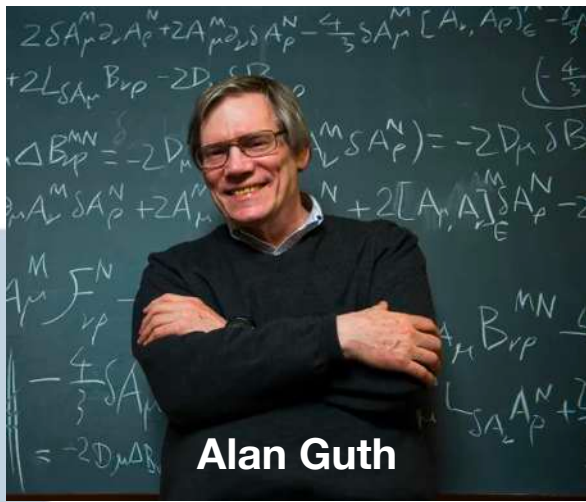


vs.

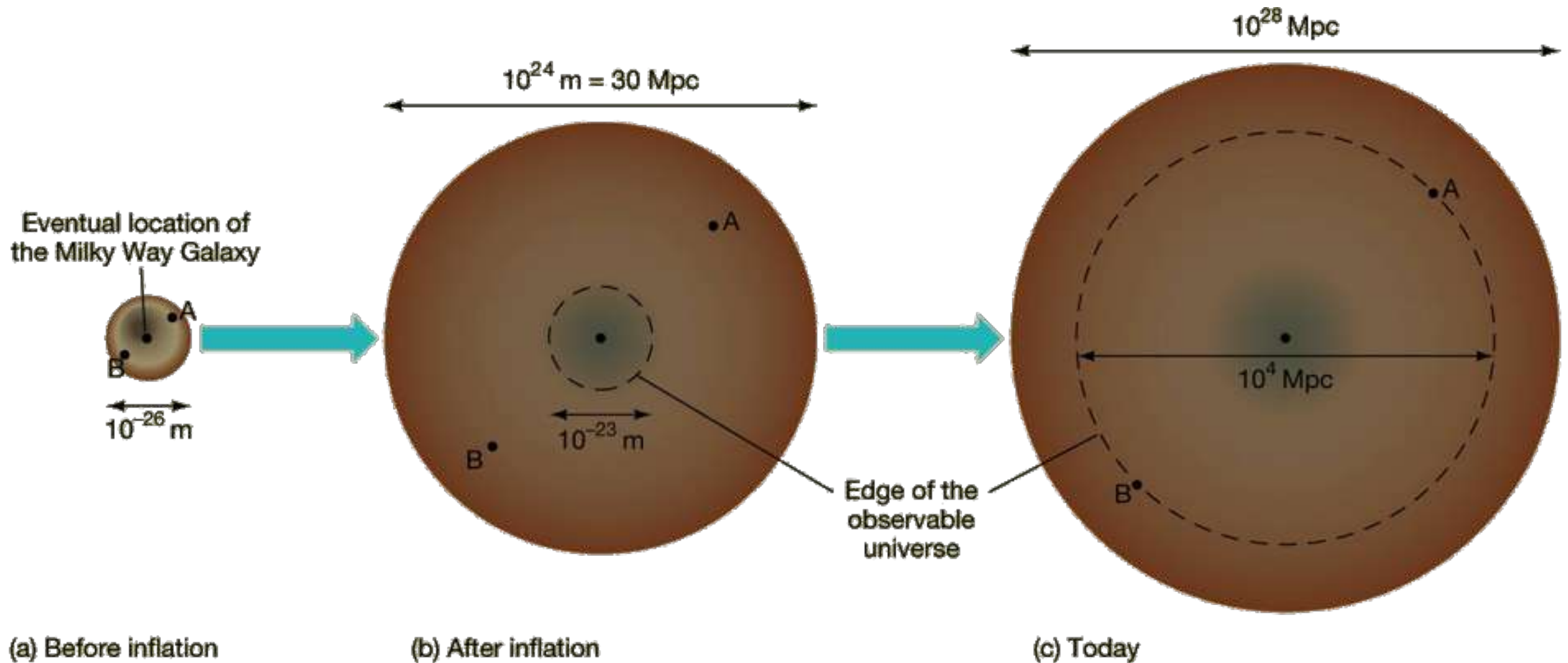


Le problème de l'origine des fluctuations





L'horizon devient beaucoup plus grand avec l'inflation cosmique



taille de l'Univers observable

10^{-29} m



90 cm



14.000 Mpc

10^{-35} sec

10^{-32} sec

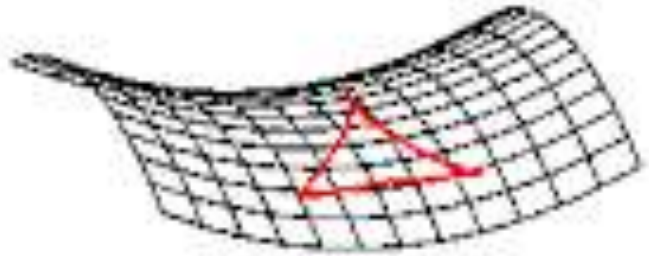
aujourd'hui
13,4 milliards d'années

inflation : solution pour le problème de la platitude

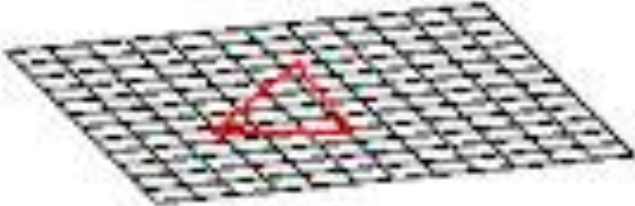
Equations de Friedmann

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

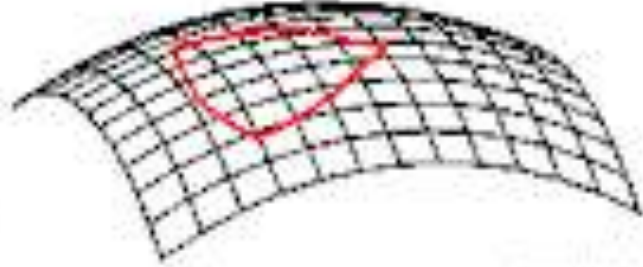
énergie cinétique
 énergie potentielle
 énergie totale



Univers ouvert : ressemble à une selle de cheval

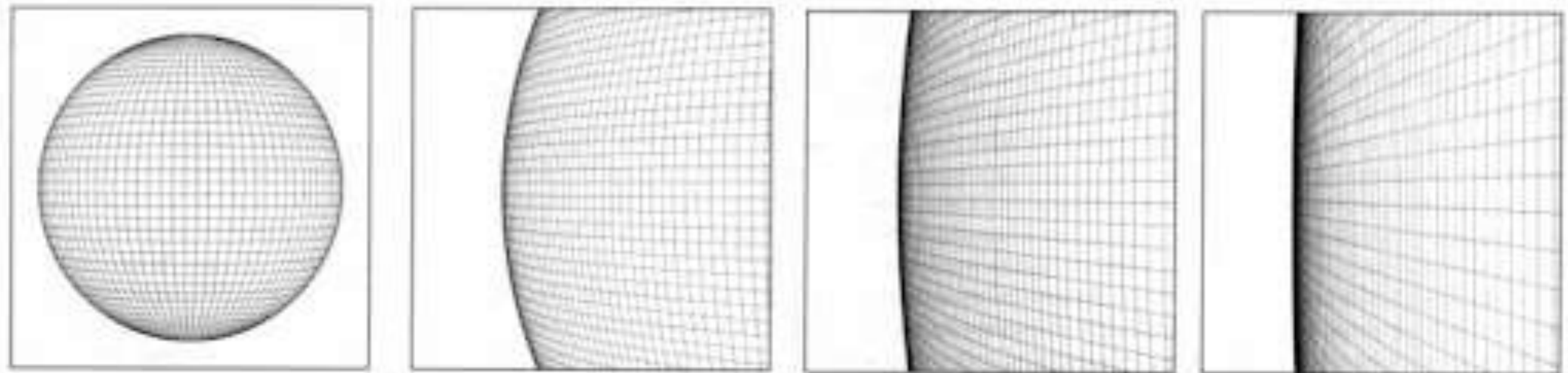


Univers plat

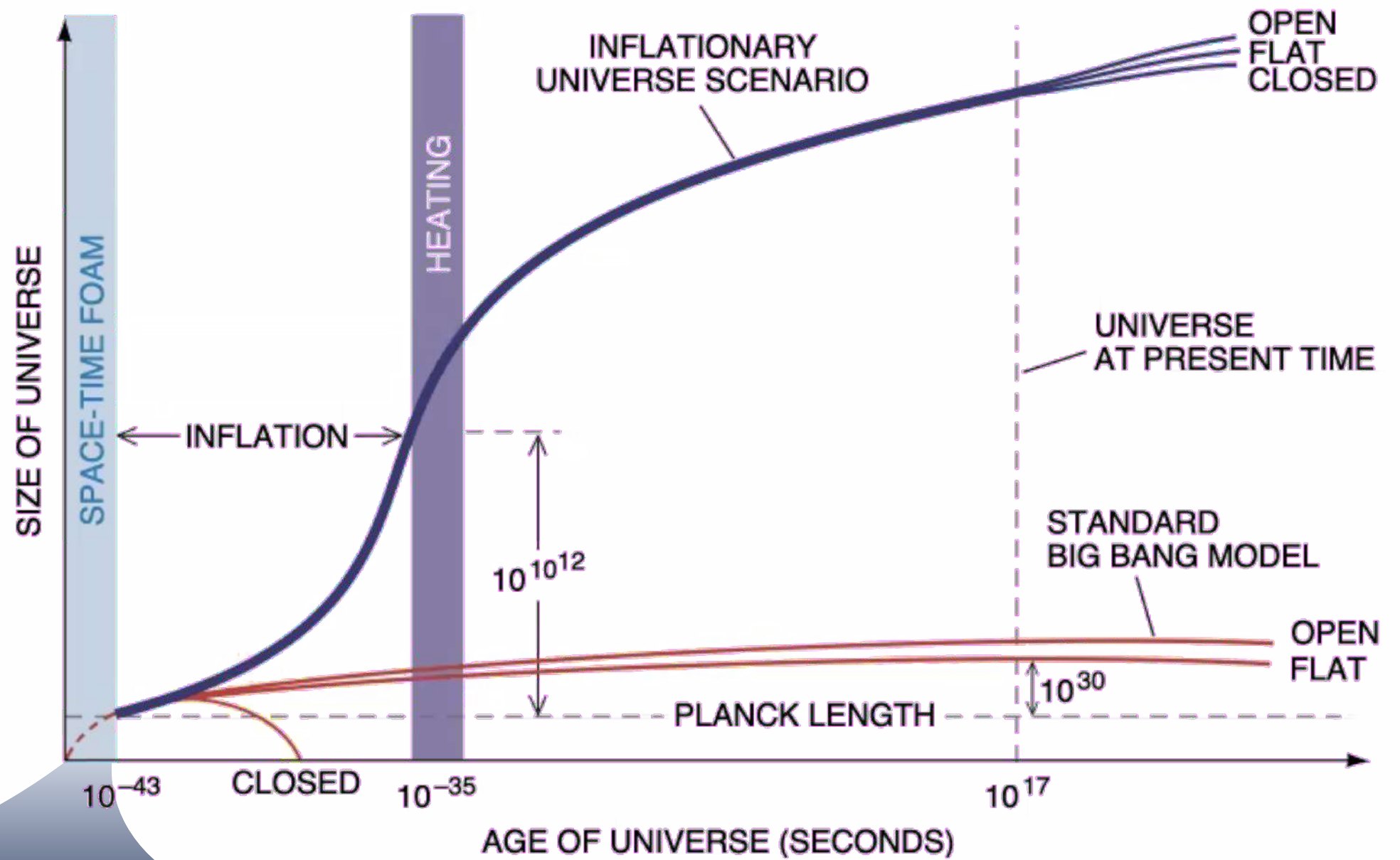


Univers fermé : semblable à la surface d'une sphère

numiano



inflation



**l'inflation propose aussi
une origine aux fluctuations
du rayonnement fossile**

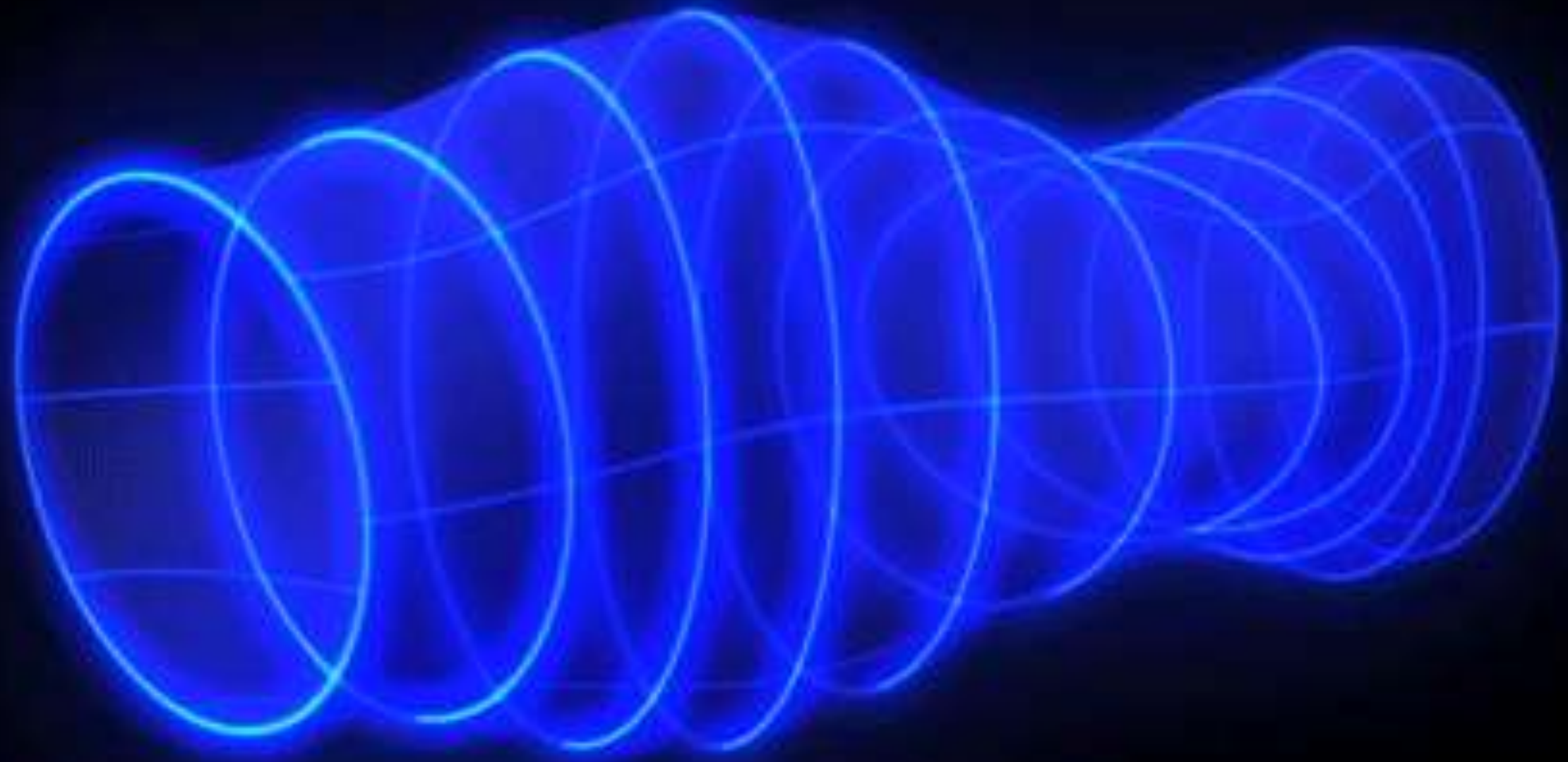
We are the product of quantum
fluctuations in the very early
universe.



STEPHEN HAWKING

1942-2018

quote
tab
.com



**l'inflation doit produire
aussi des ondes
gravitationnelles**

**la communauté scientifique cherche les
empreintes de ces ondes gravitationnelles
primordiales dans le fond diffus cosmologique**



**Comment s'y
prend-t-on ?**



Quatrième et dernier chapitre de cette conférence : mesurer l'inflation cosmique ?

les predictions observationnelles de l'inflation cosmique

FINDINGS

From Inflation to Gravitational Waves to Polarized Light

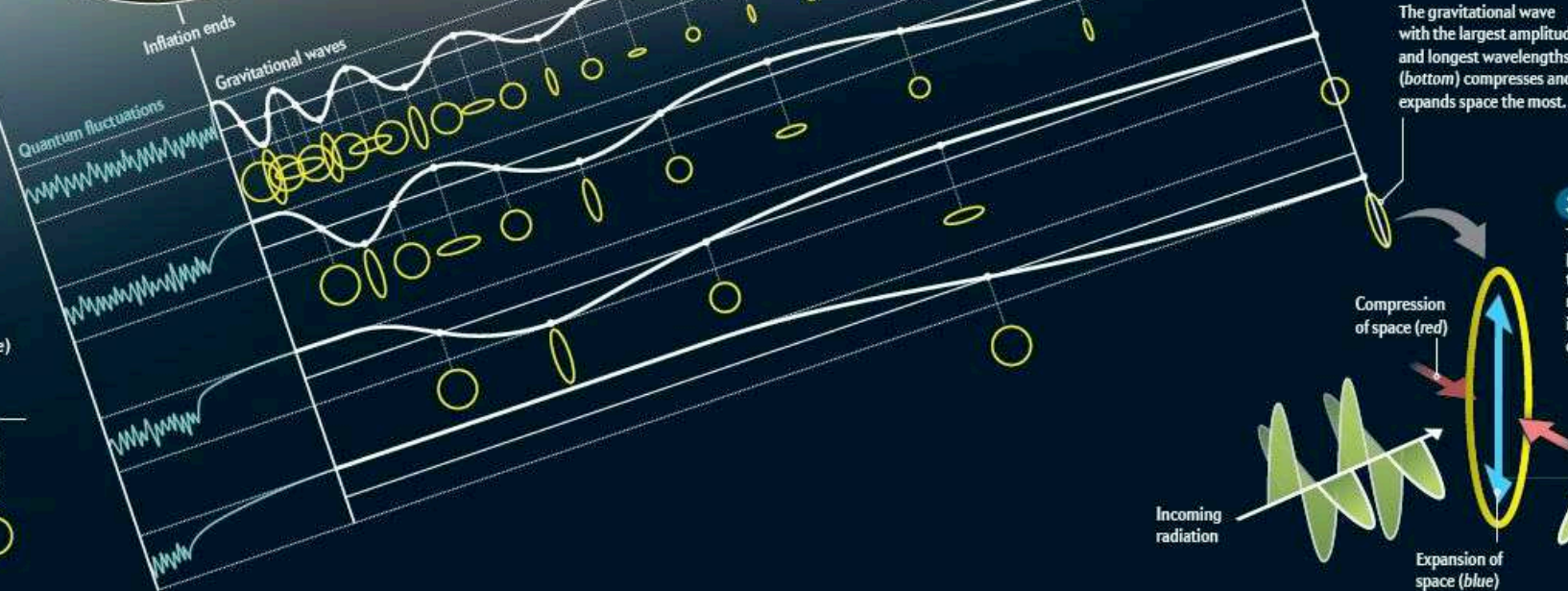
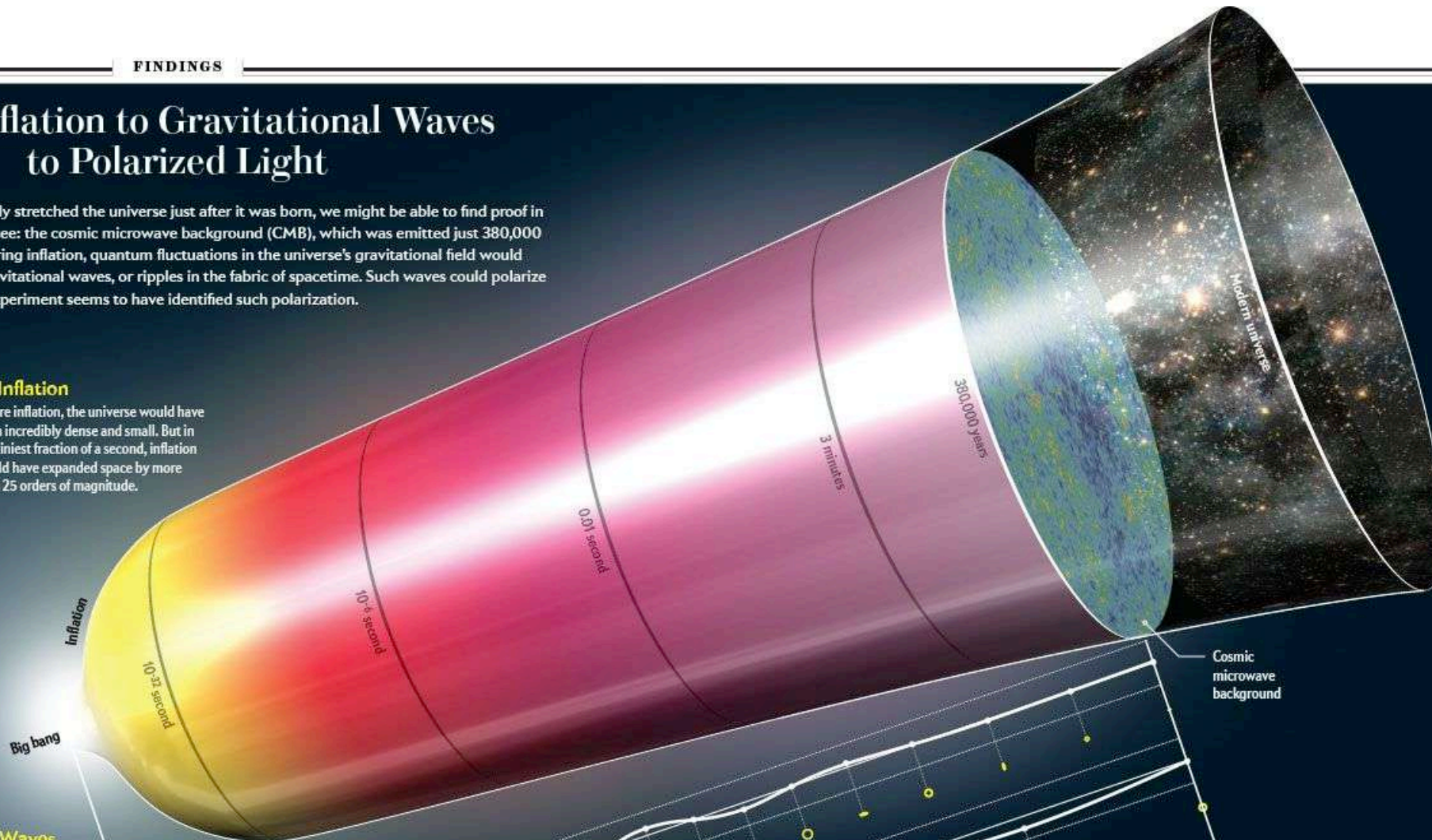
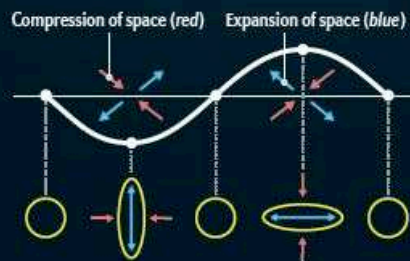
If a period of inflation rapidly stretched the universe just after it was born, we might be able to find proof in some of the oldest light we see: the cosmic microwave background (CMB), which was emitted just 380,000 years after the big bang. During inflation, quantum fluctuations in the universe's gravitational field would have been amplified into gravitational waves, or ripples in the fabric of spacetime. Such waves could polarize the CMB, and the BICEP2 experiment seems to have identified such polarization.

1 Inflation

Before inflation, the universe would have been incredibly dense and small. But in the tiniest fraction of a second, inflation would have expanded space by more than 25 orders of magnitude.

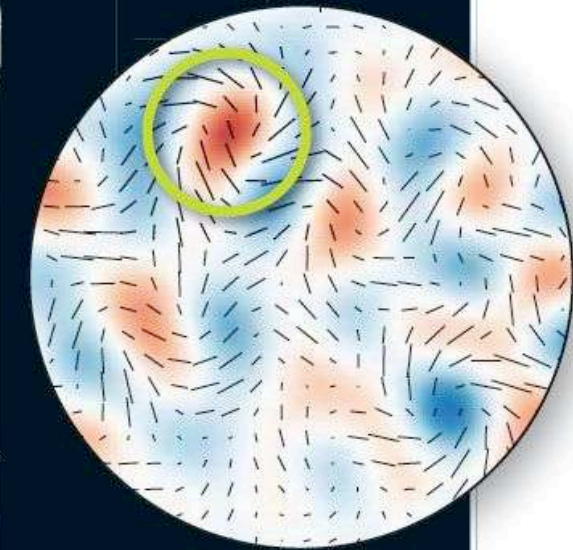
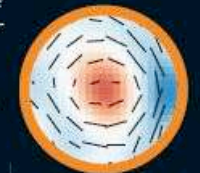
2 Gravitational Waves

During inflation, tiny quantum fluctuations in the gravitational field pervading the universe would have been stretched. The wavelength of some fluctuations would get so big they would require longer than the age of the (then very young) universe to oscillate, so they would "freeze" until the universe was old enough for them to again oscillate. When inflation ended, these oscillations had grown into long-wavelength gravitational waves that alternately stretched and compressed space around them (ellipses below).



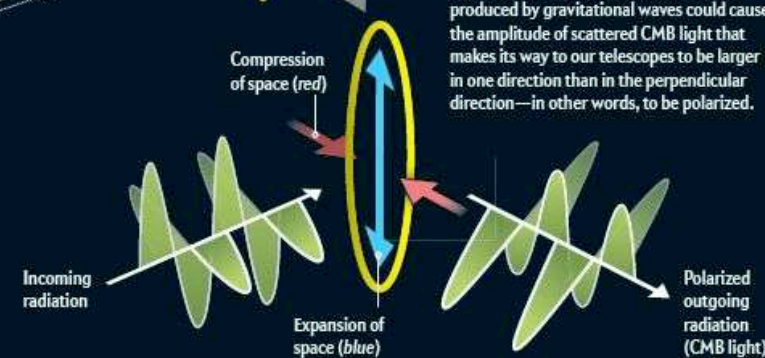
4 Pinwheels

Polarization can take several forms. Normal local temperature and density fluctuations in space produce a radial or circular pattern of polarization (orange circle). Gravitational waves, however, produce a striking pinwheel pattern (below). Red spots here are where space has been compressed, so photons are packed tighter together and the radiation is hotter. Blue areas are cooler.

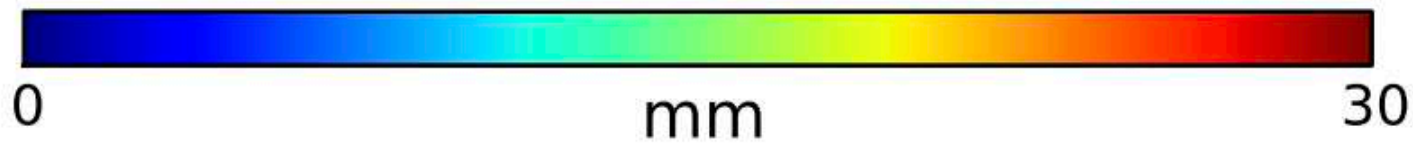
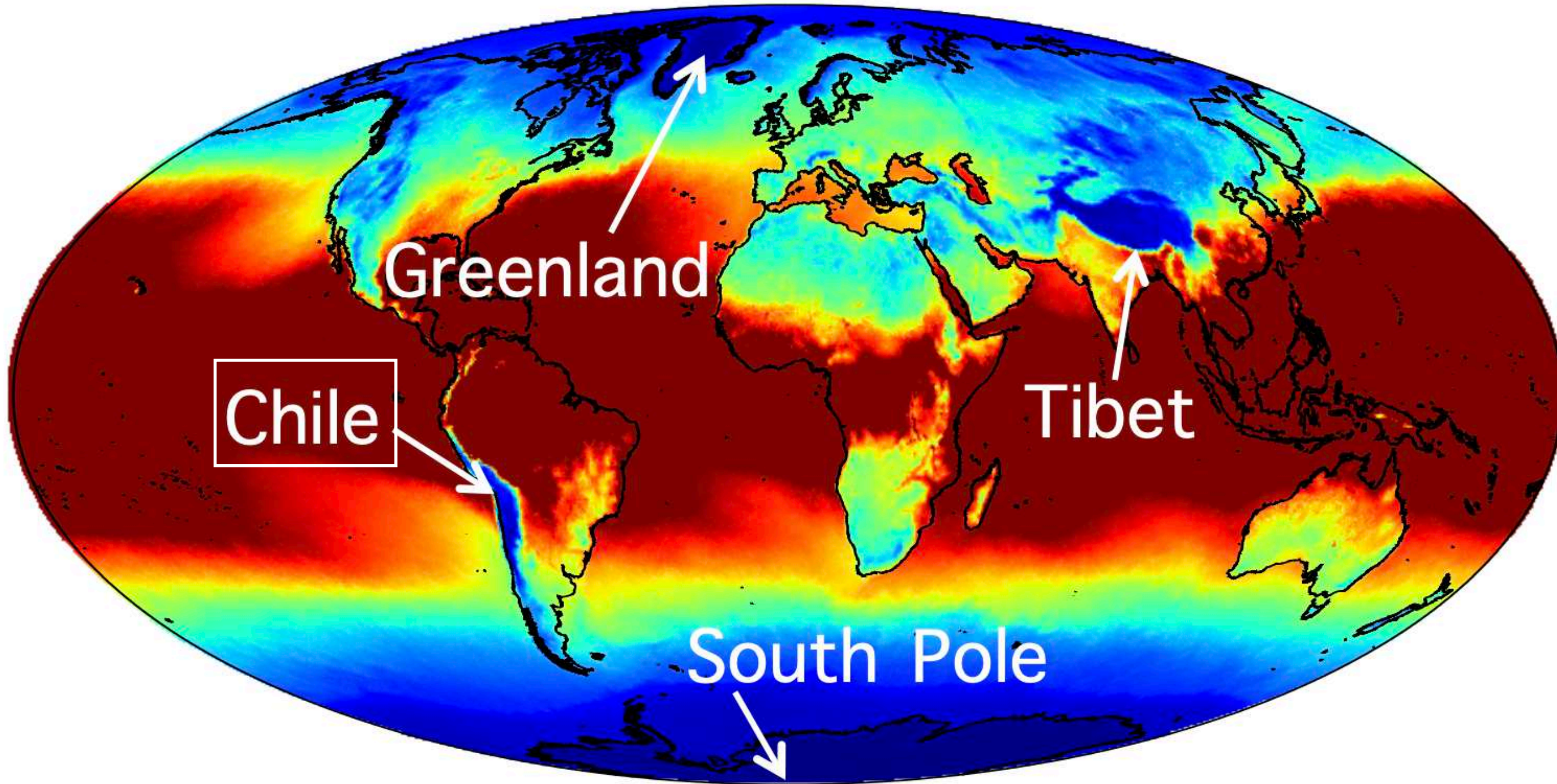


3 Polarization

The compression and expansion of space produced by gravitational waves could cause the amplitude of scattered CMB light that makes its way to our telescopes to be larger in one direction than in the perpendicular direction—in other words, to be polarized.



Mean Clear Sky PWV

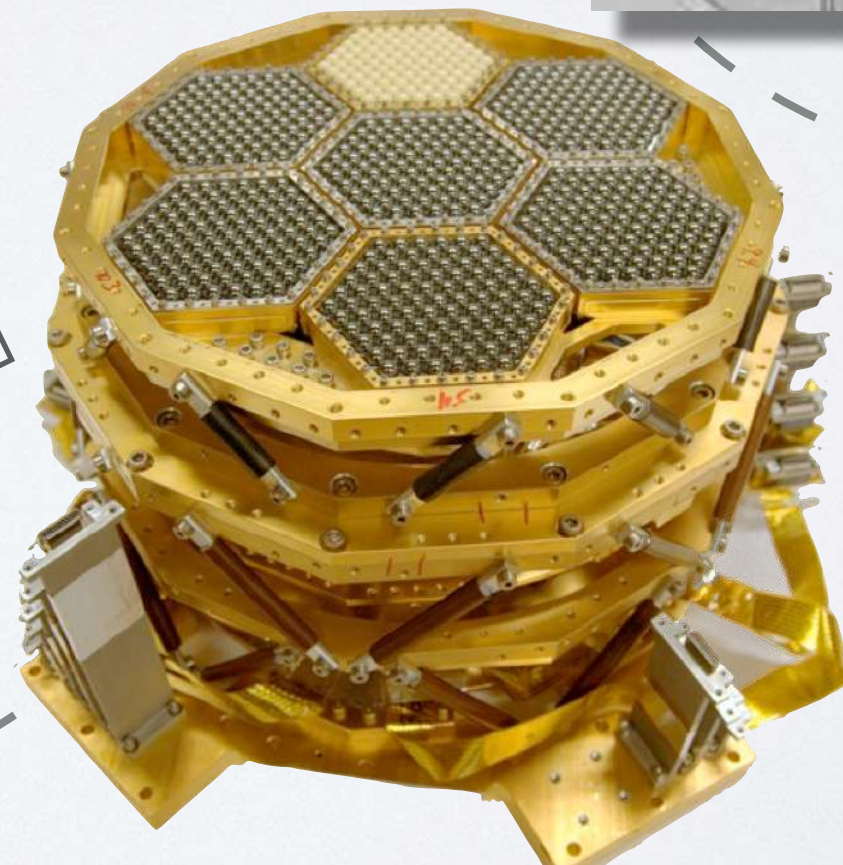
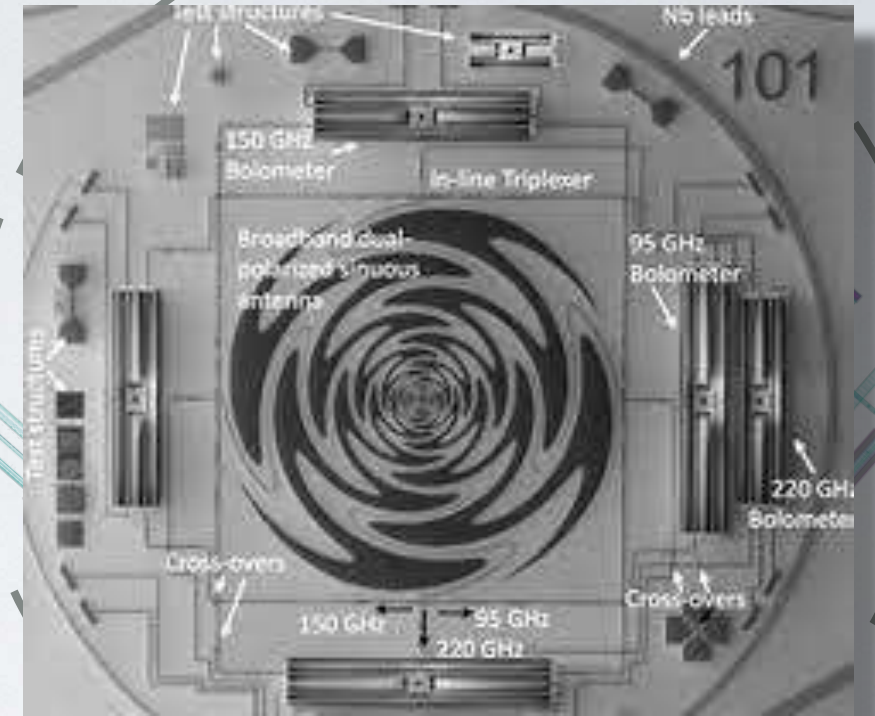
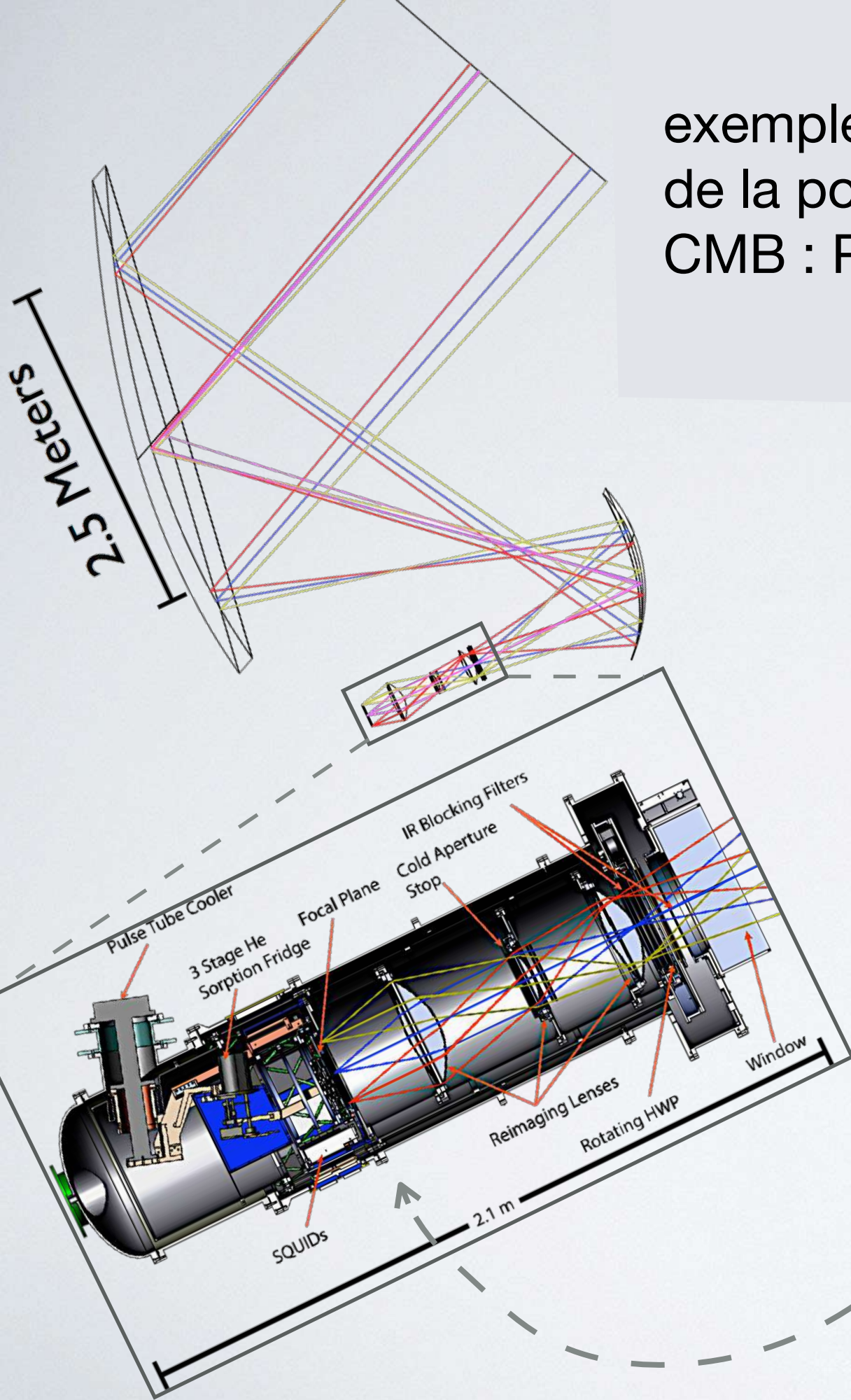


quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère

exemple du site au Chili



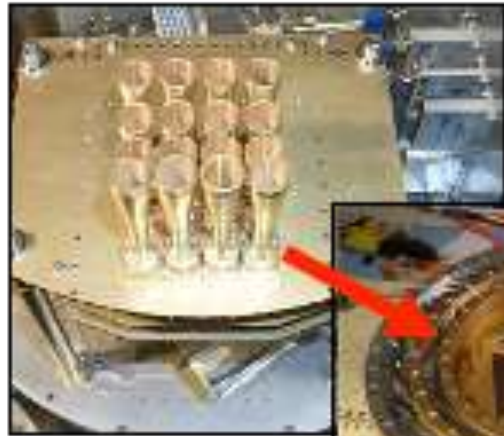
exemple d'observatoire de la polarisation du CMB : POLARBEAR



la sensibilité des instruments dépend du nombre de détecteurs

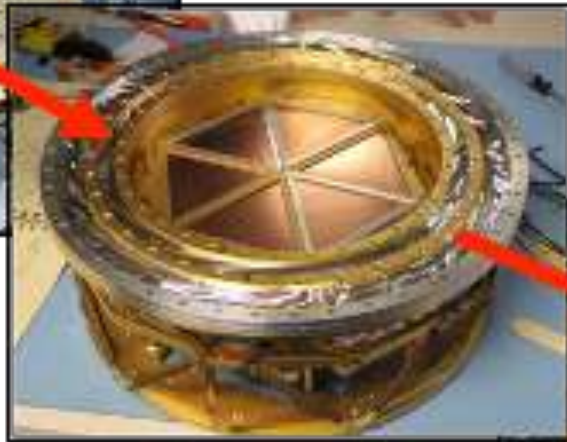
2001: ACBAR

16 detectors



2007: SPT

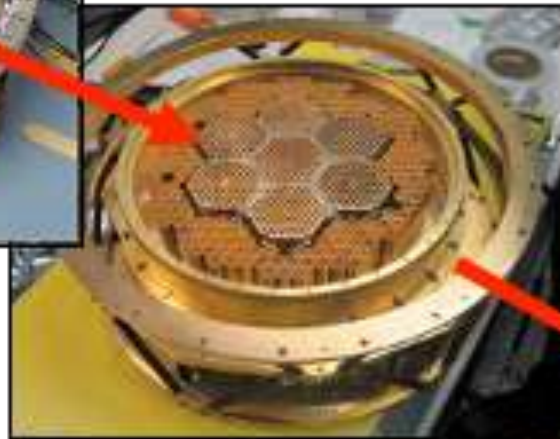
960 detectors



Stage-2

2012: SPTpol

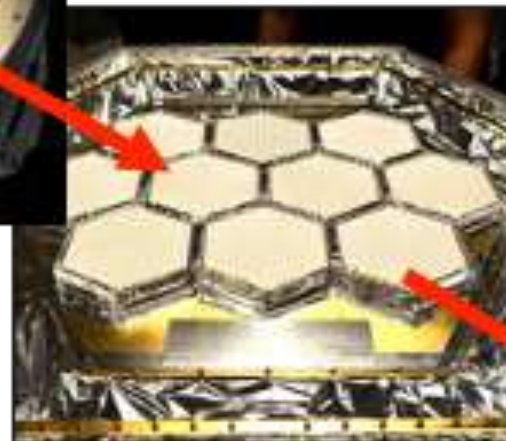
~1600 detectors



Stage-3

2016: SPT-3G

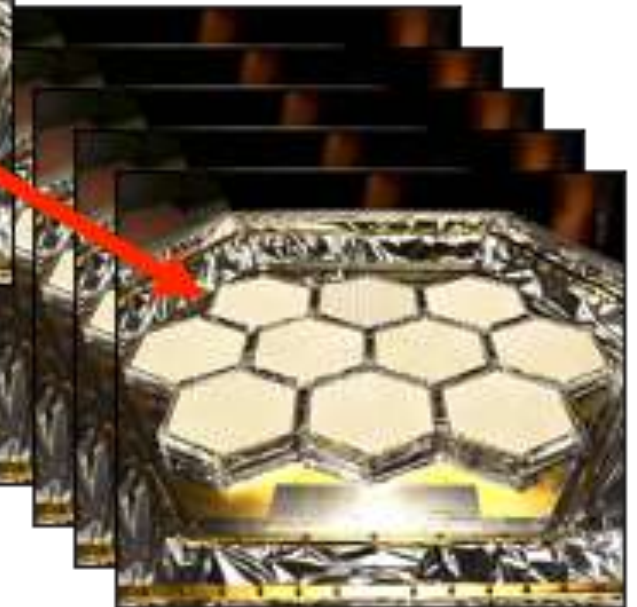
~16,000 detectors



Stage-4

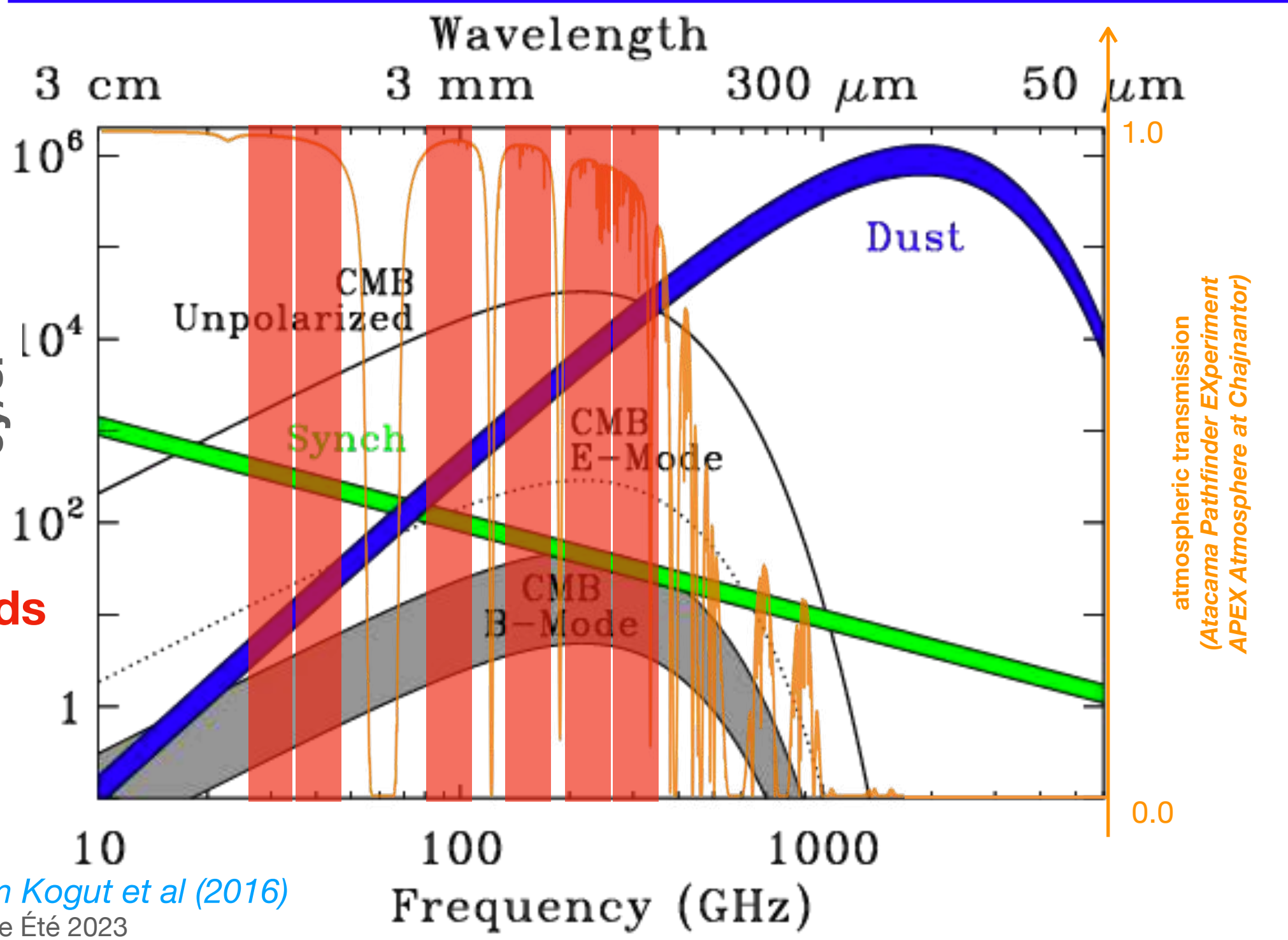
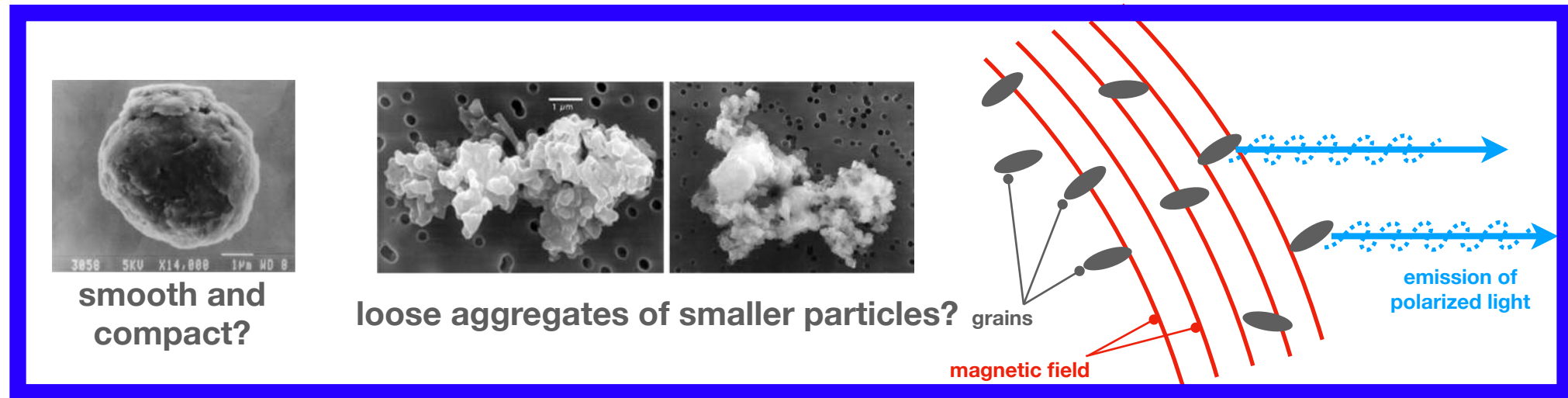
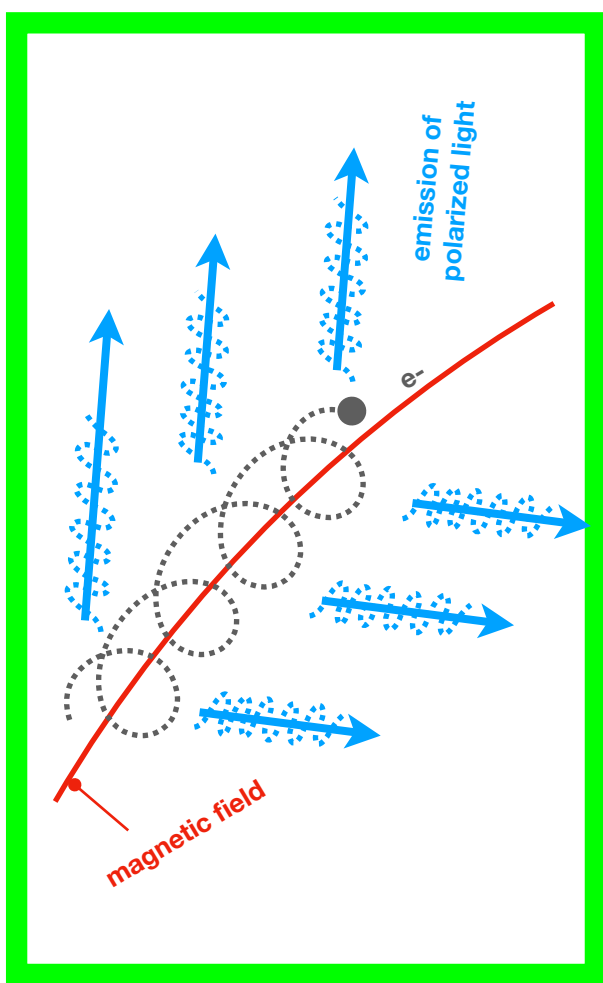
202: CMB-S4

500,000 detectors



Detector sensitivity has been limited by photon “shot” noise for last ~15 years; further improvements are made only by making more detectors!

credits: Nils Halverson



SO observed frequencies

**6 frequency bands
27-270 GHz**

Time Domain Astrophysics

Tidal Disruption

Stellar Flares

Variable AGN

Cosmology and Particle Physics

H_0 Tension and New Physics

Light Relics and Neutrinos

Evolution of the Universe
over Cosmic Time



Extragalactic Astronomy

Sources

Missing Baryons

Galaxy Clusters

Galactic Astronomy

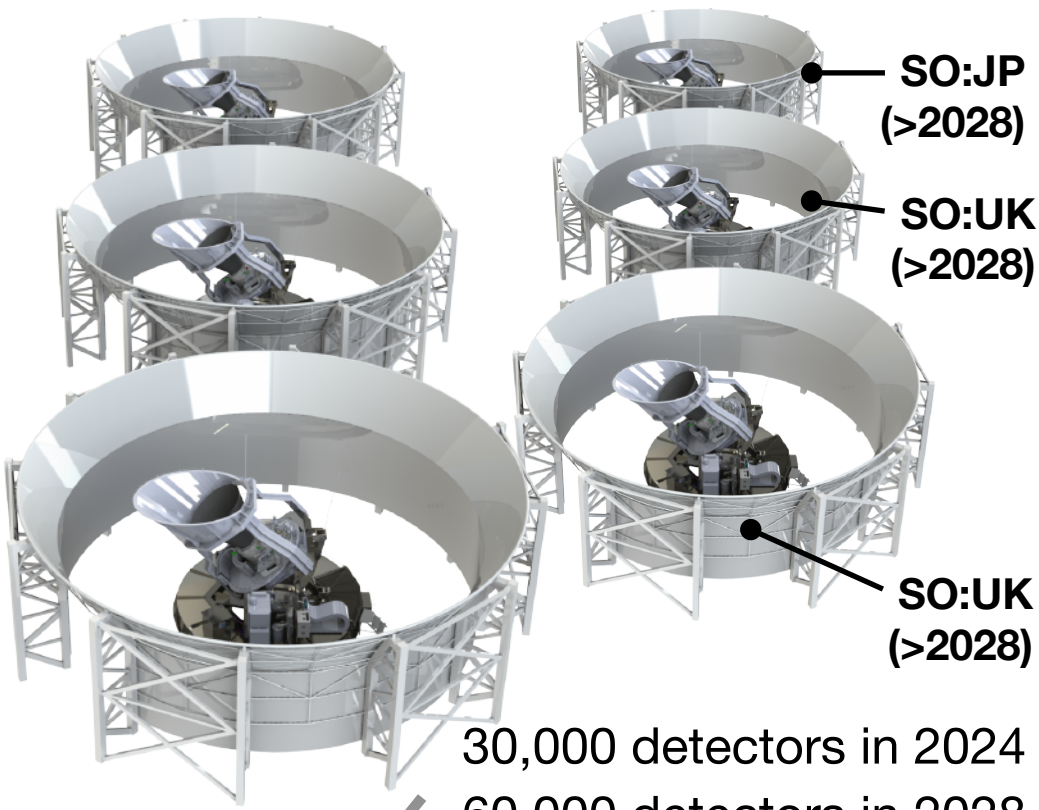
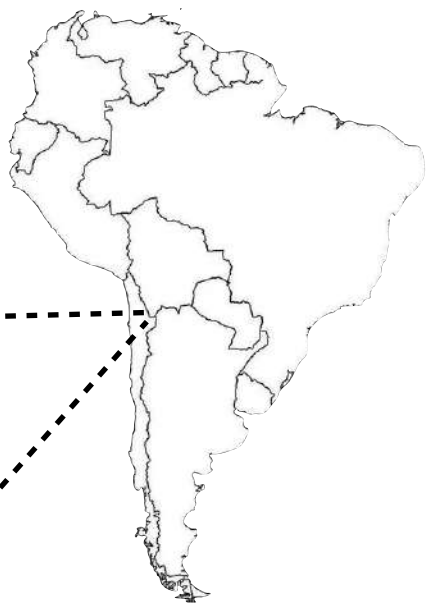
Interstellar
dust

Star Formation.
Magnetic Fields and
Turbulence

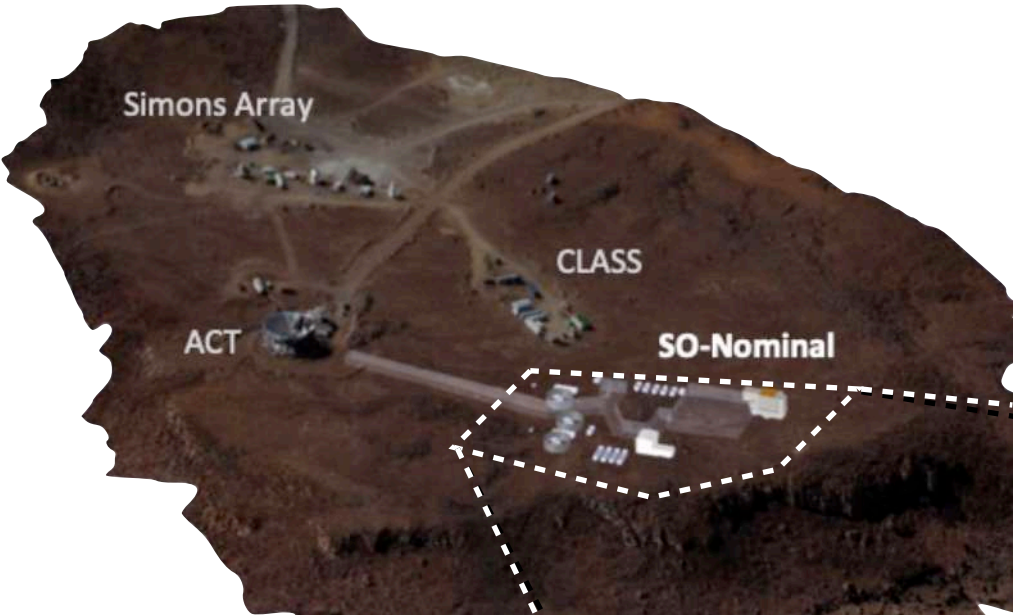
Planetary science

Exo-Oort
Clouds

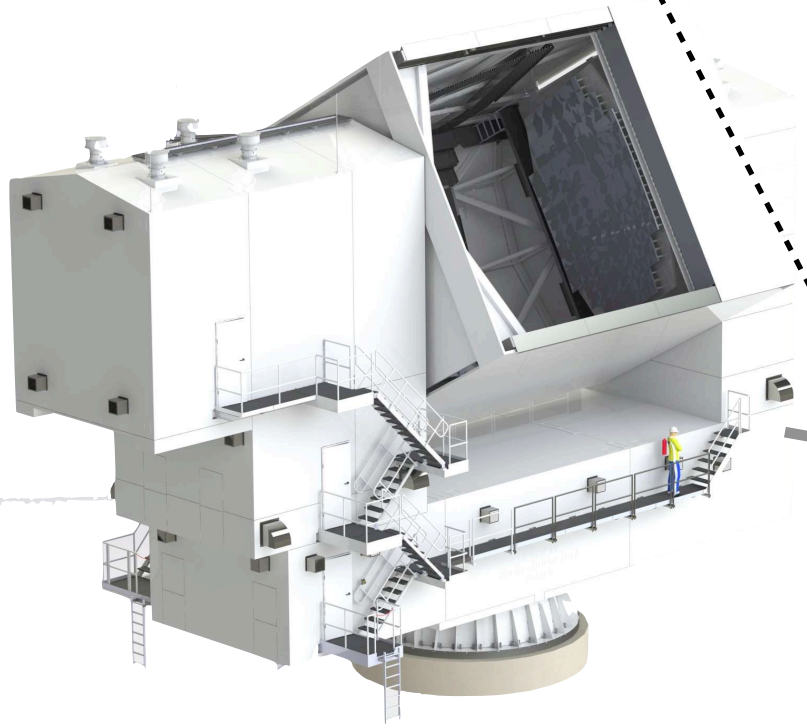
Planet 9



30,000 detectors in 2024
60,000 detectors in 2028

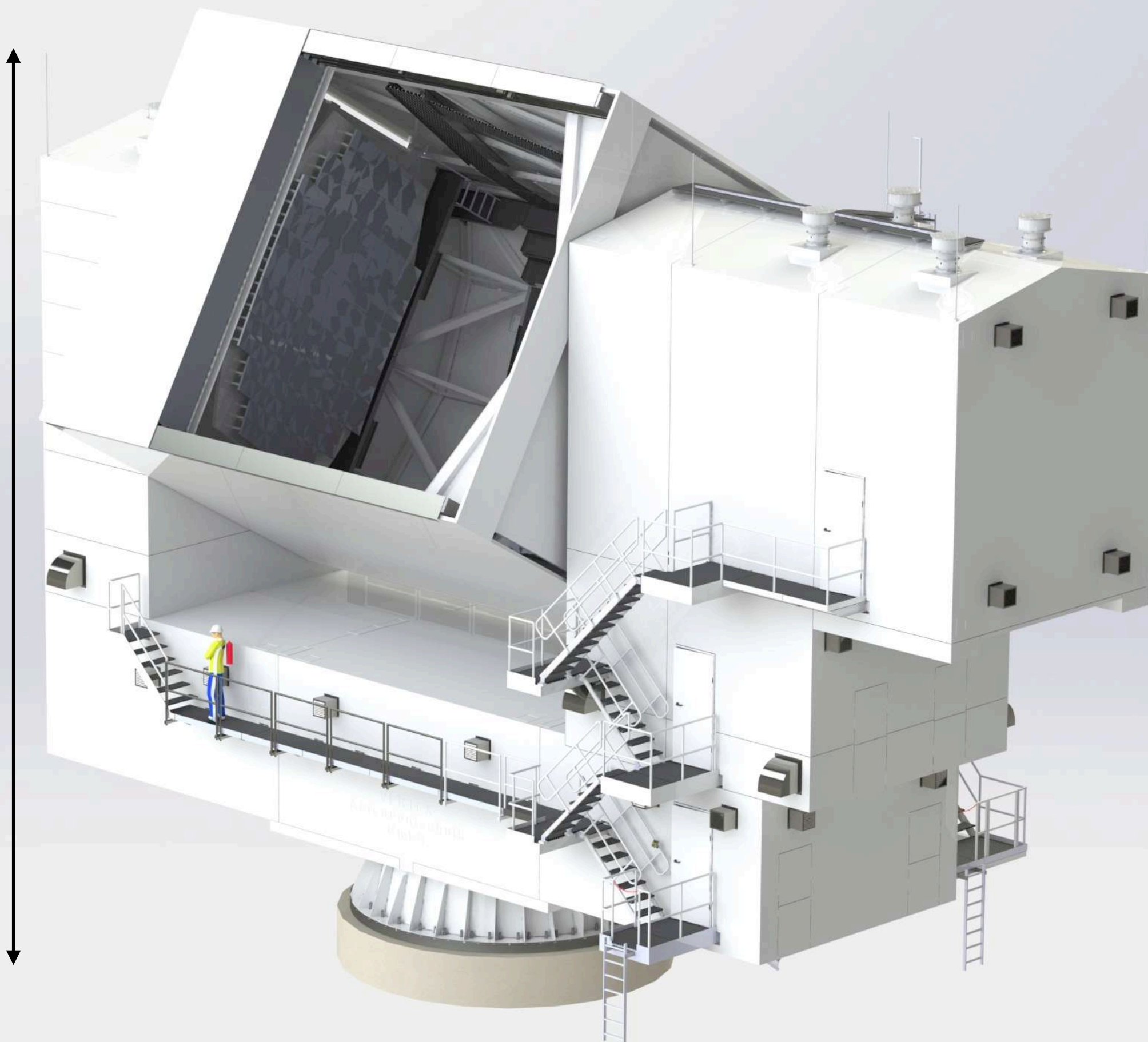


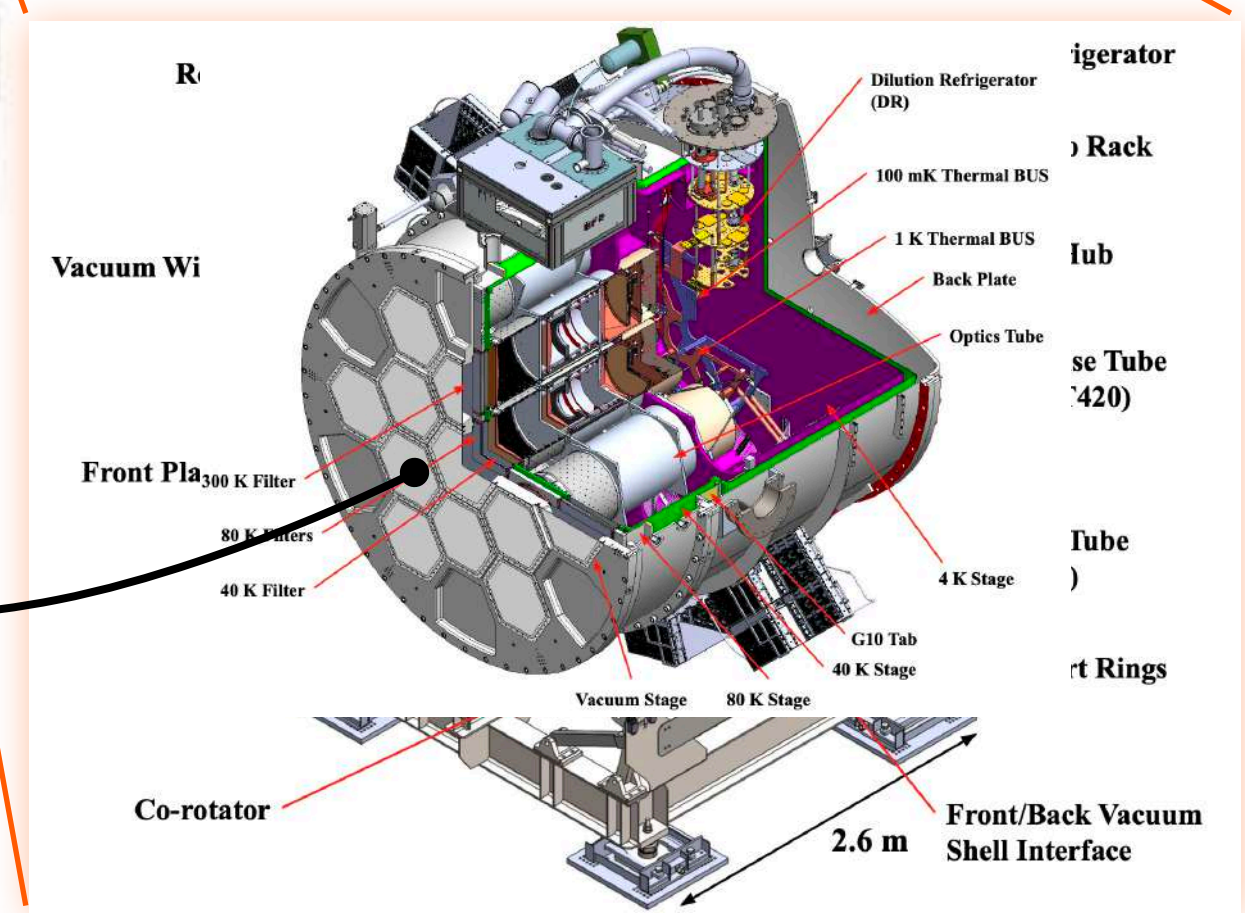
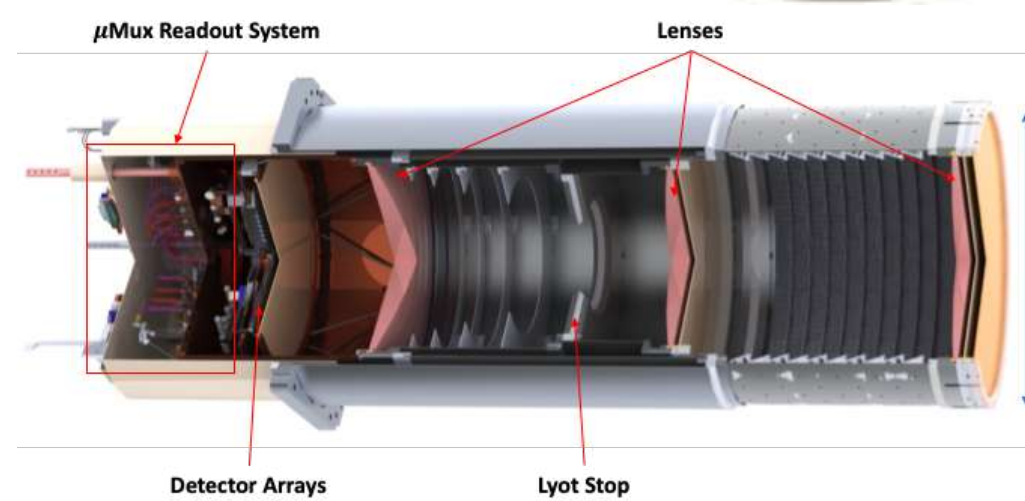
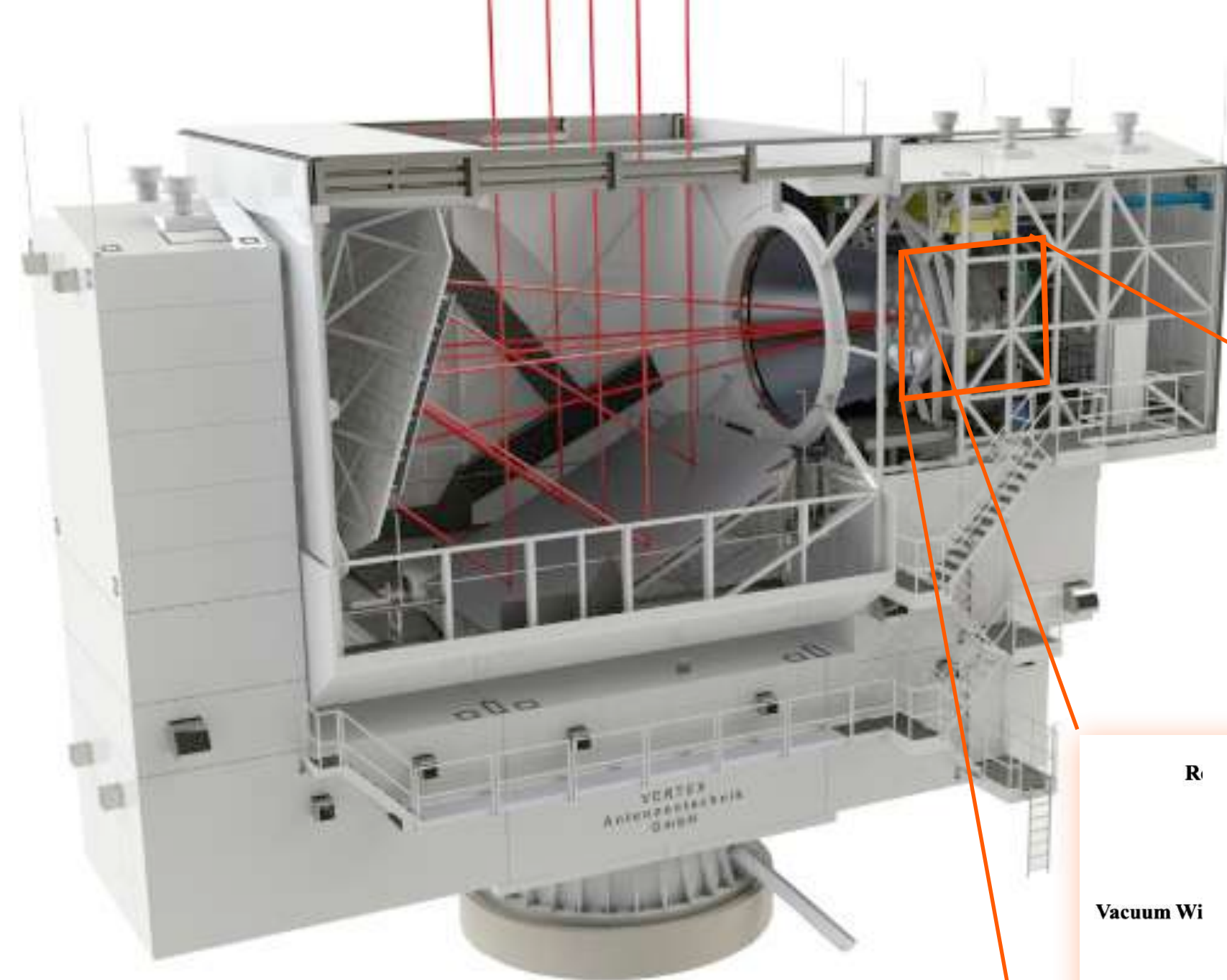
30,000 detectors in 2024
60,000 detectors in 2028





~15m





LATR

Chile,
January
2023



LATR

Chile,
January
2023

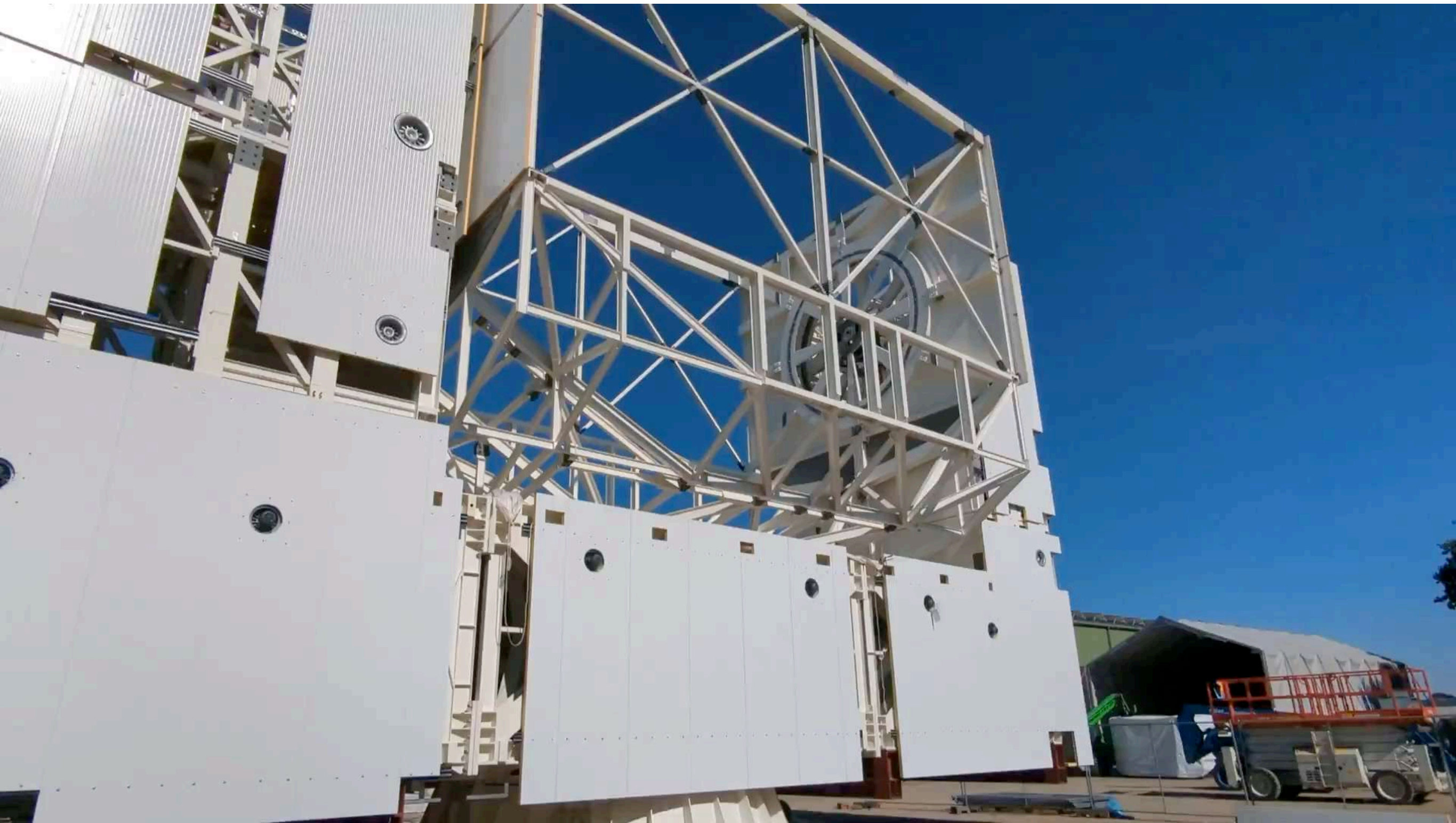




LATR

Chile,
February
2023

LAT in August 2022 (Germany)



LAT in April 2023 (Chile)



LAT in April 2023 (Chile)



LAT on 26 of June 2023 (Chile)



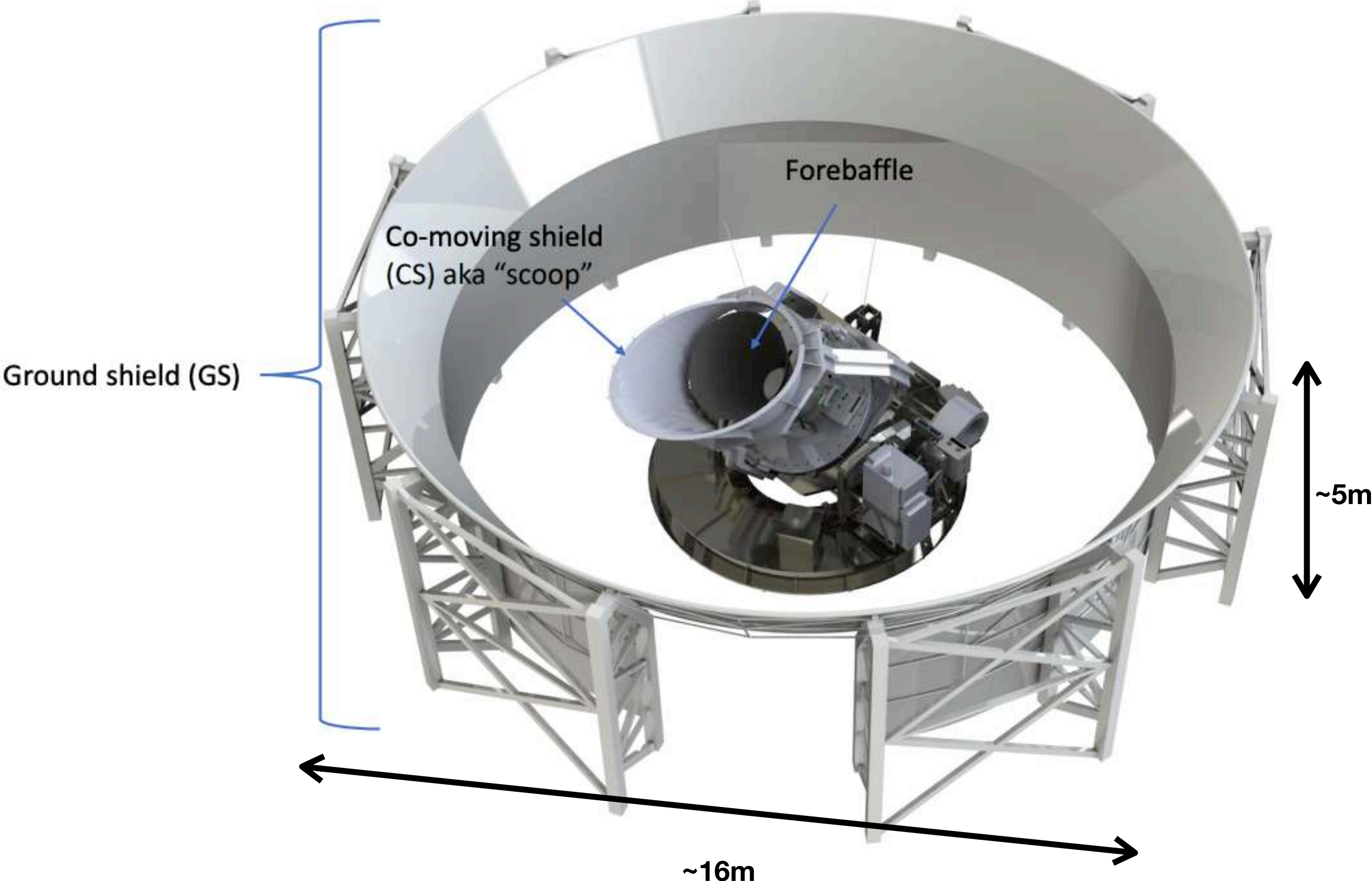
LAT on 18 of July 2023 (Chile)



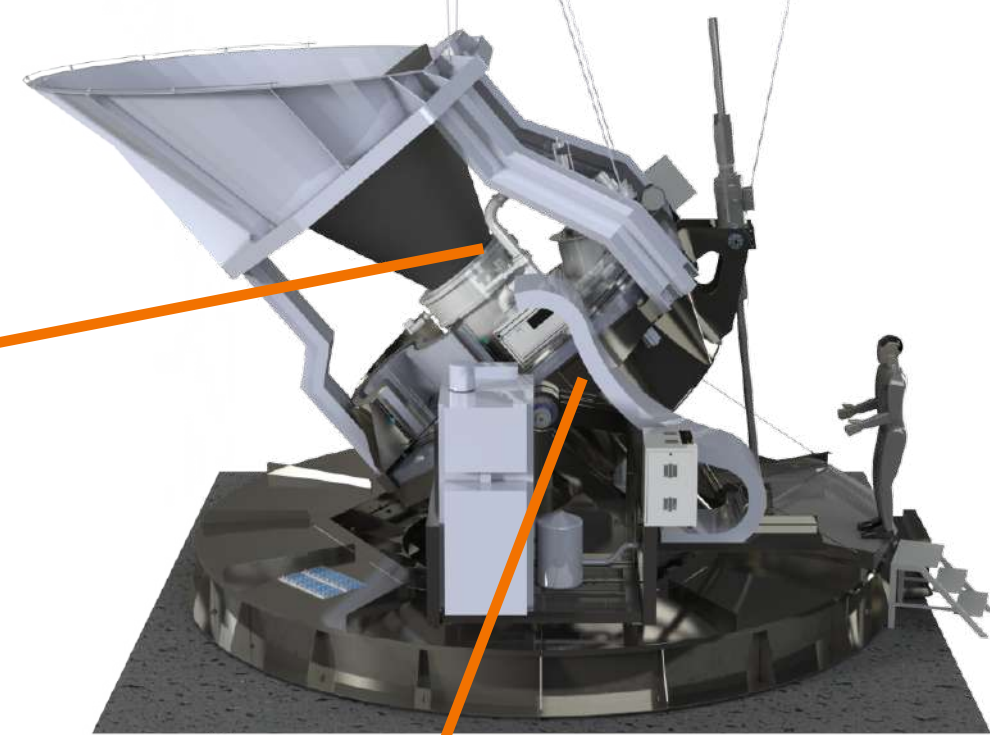
site Feb 2023 (Chile)



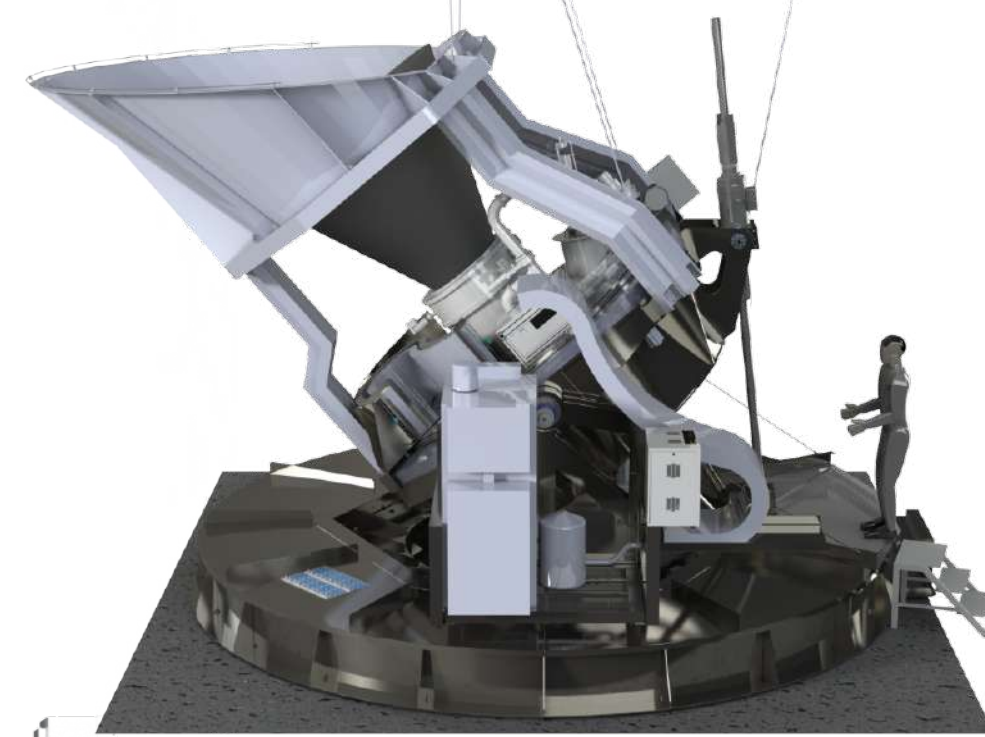
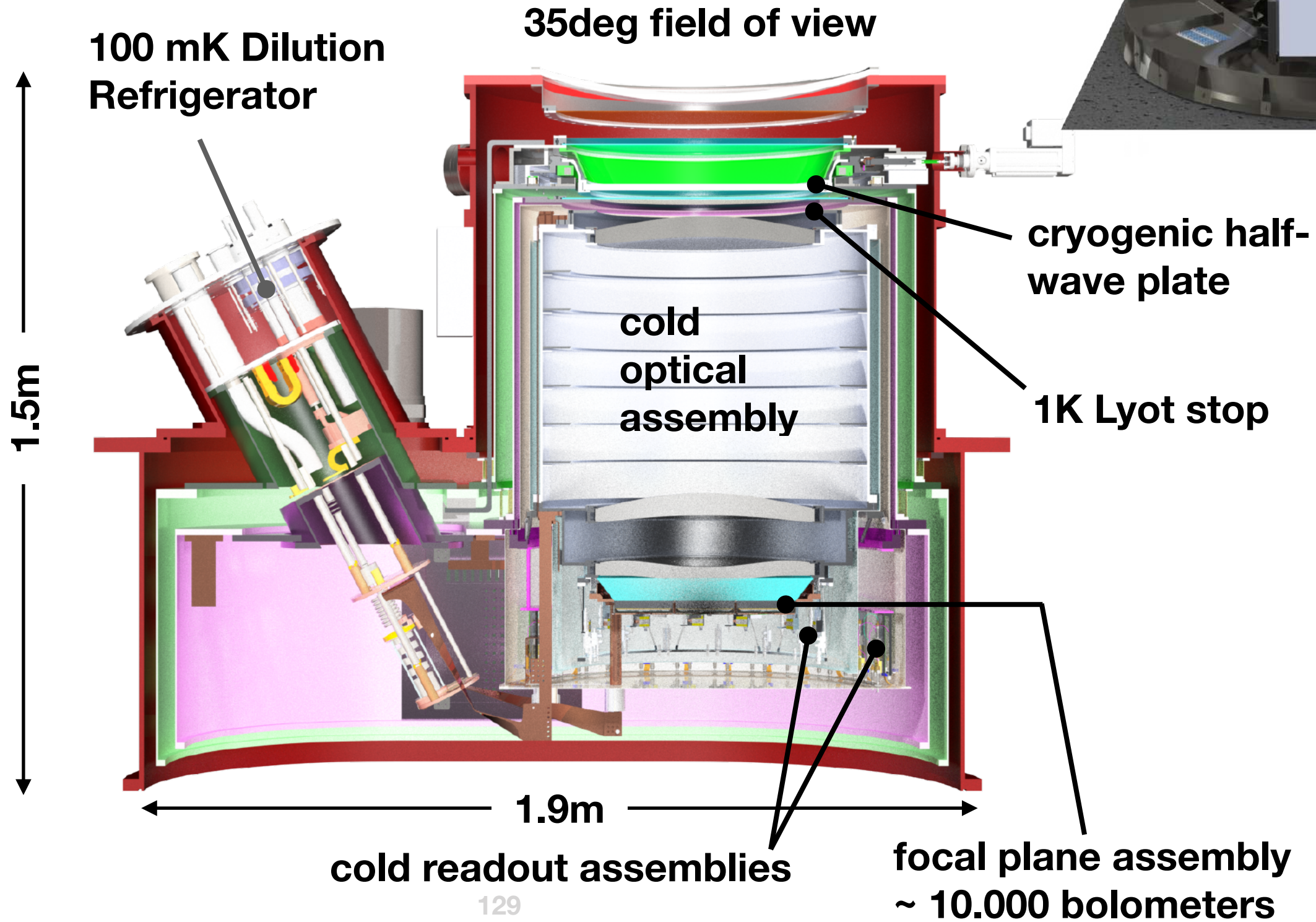
SO SAT



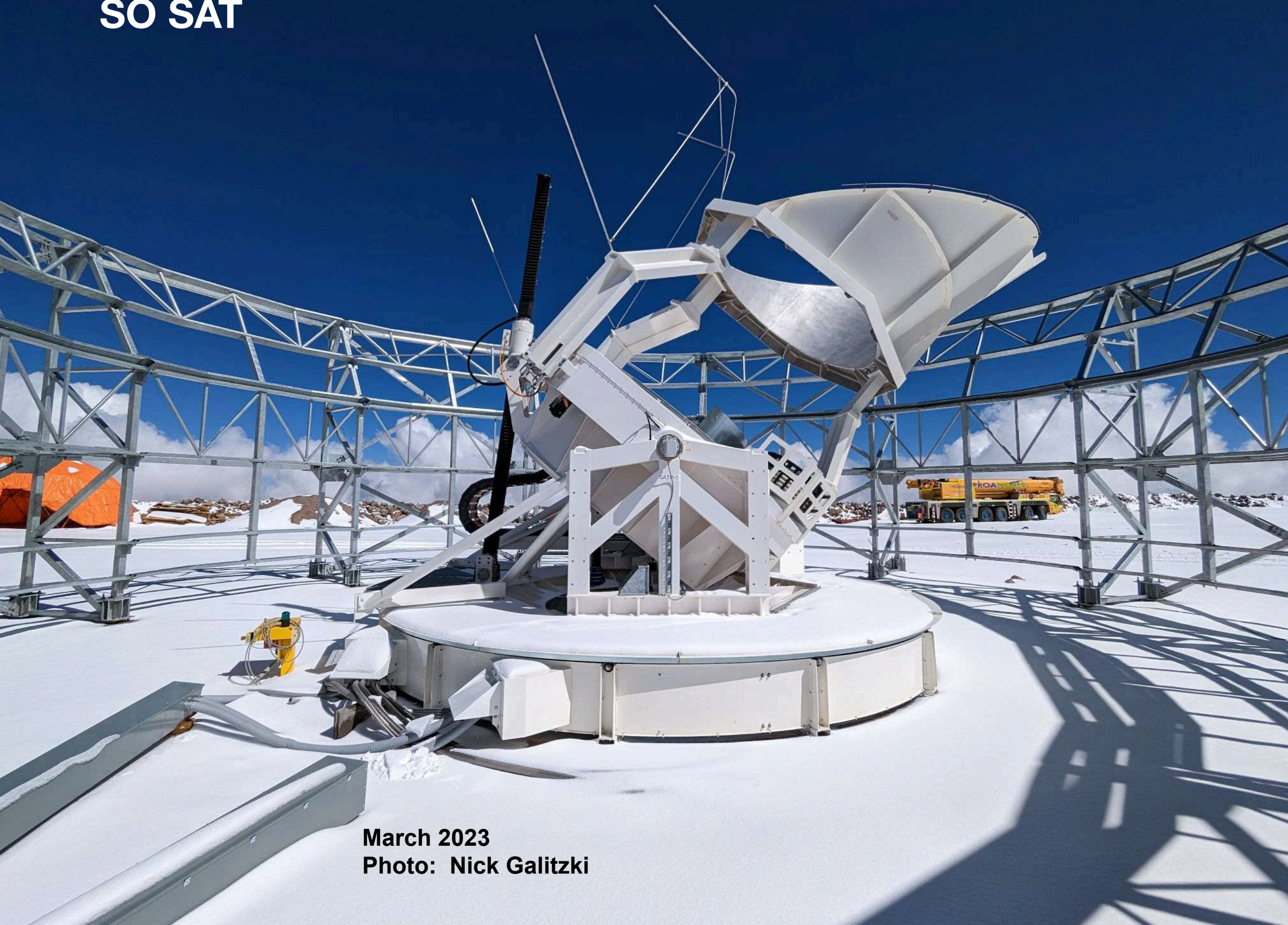
SO SAT



SO SAT



SO SAT



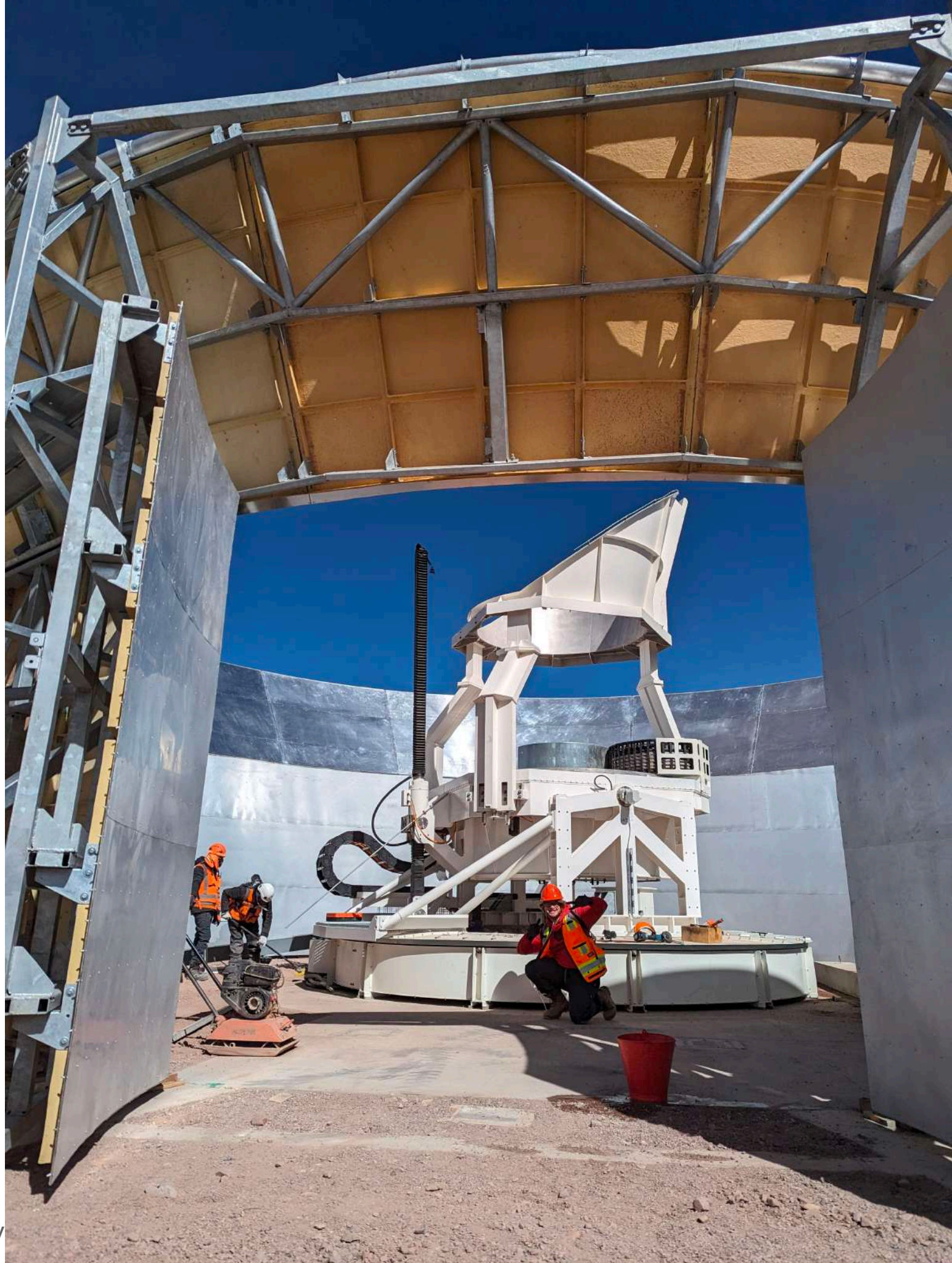
March 2023
Photo: Nick Galitzki

SO SAT

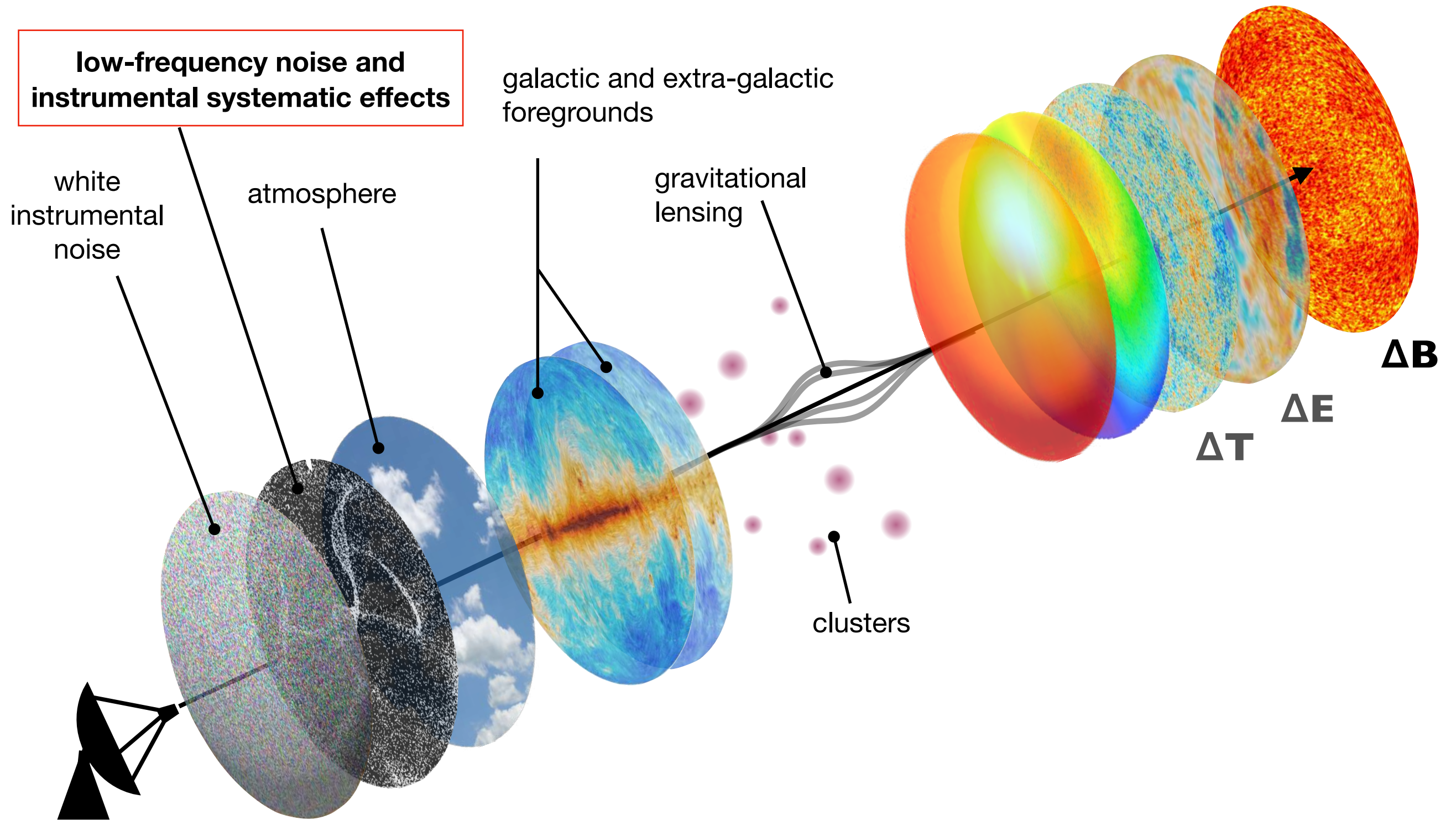


**April 2023
Credit: Dave Boettger**





Résumé des problématiques liées à l'observation des modes-B du CMB



control of instrumental systematics effects: examples



credits: H. Nakata

Polarization grid for relative and absolute polarization angle calibration



credits: J. Sugiyama

Cryogenic
Rotative Half
Wave Plate

credits: T. Matsumura

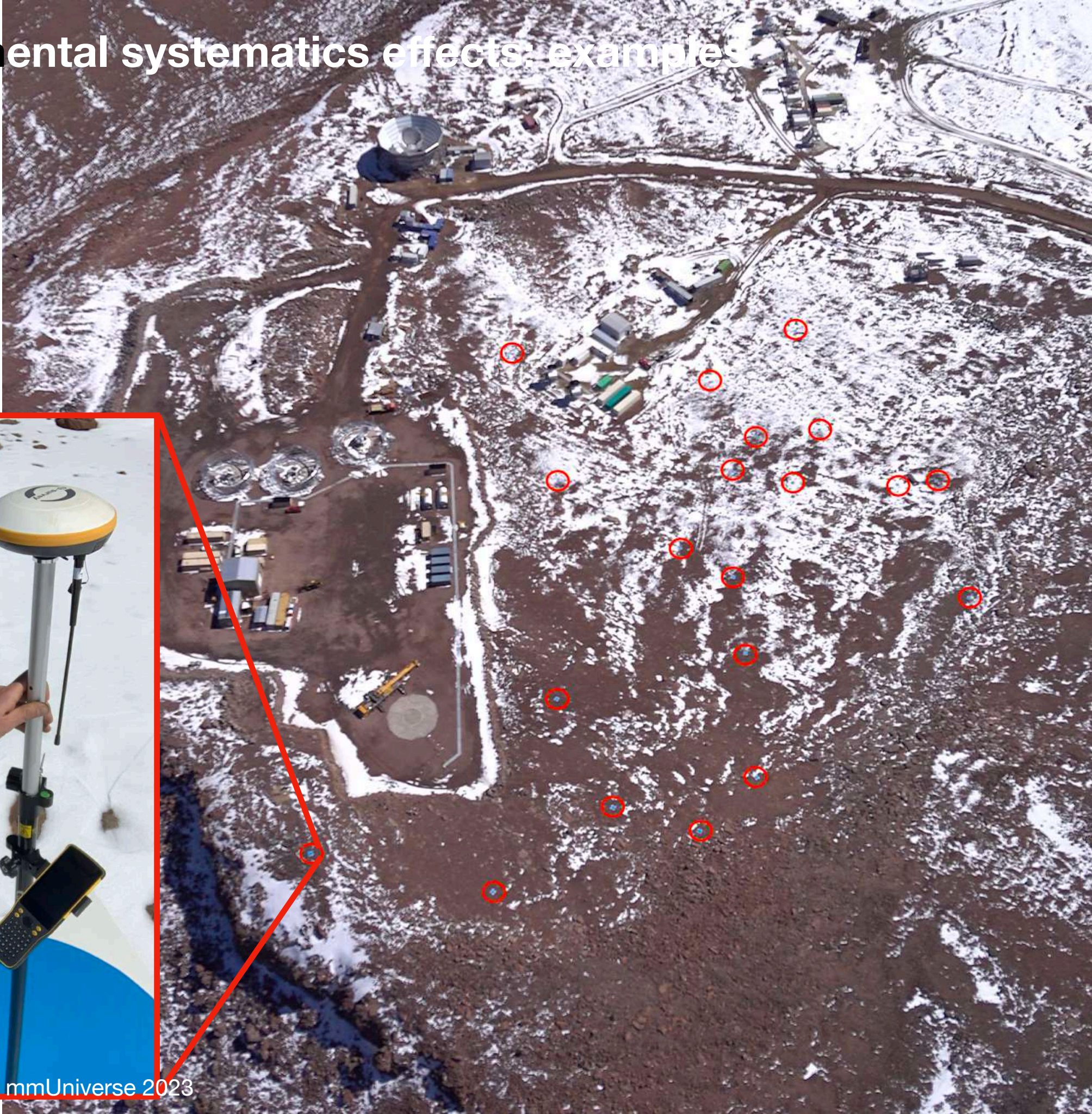
Assembly of Baffles





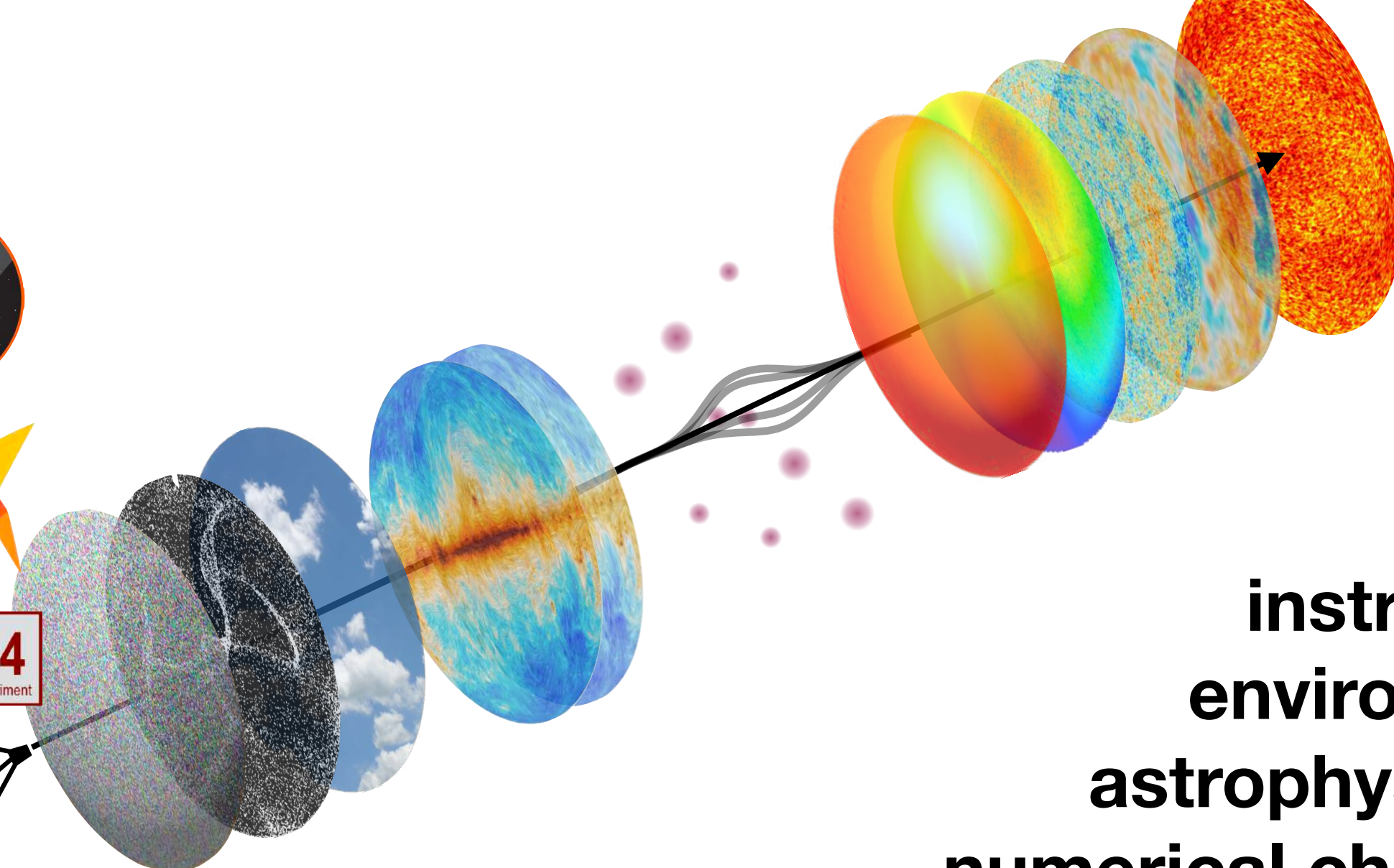


control of instrumental systematics effects: examples

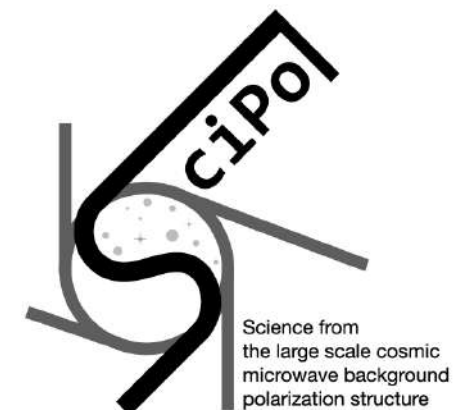
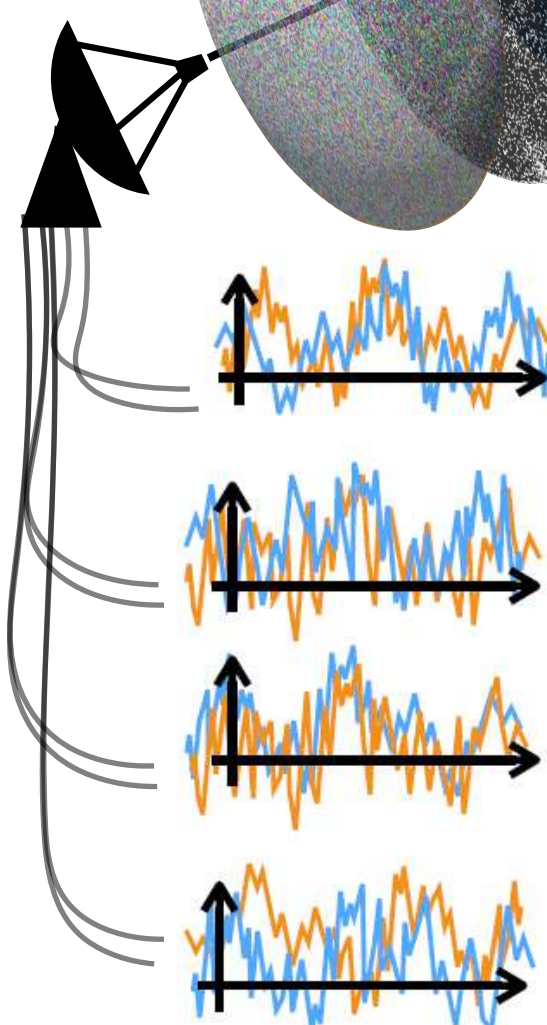




CMB-S4
Next Generation CMB Experiment



**instrumental,
environmental,
astrophysical and
numerical challenges!**



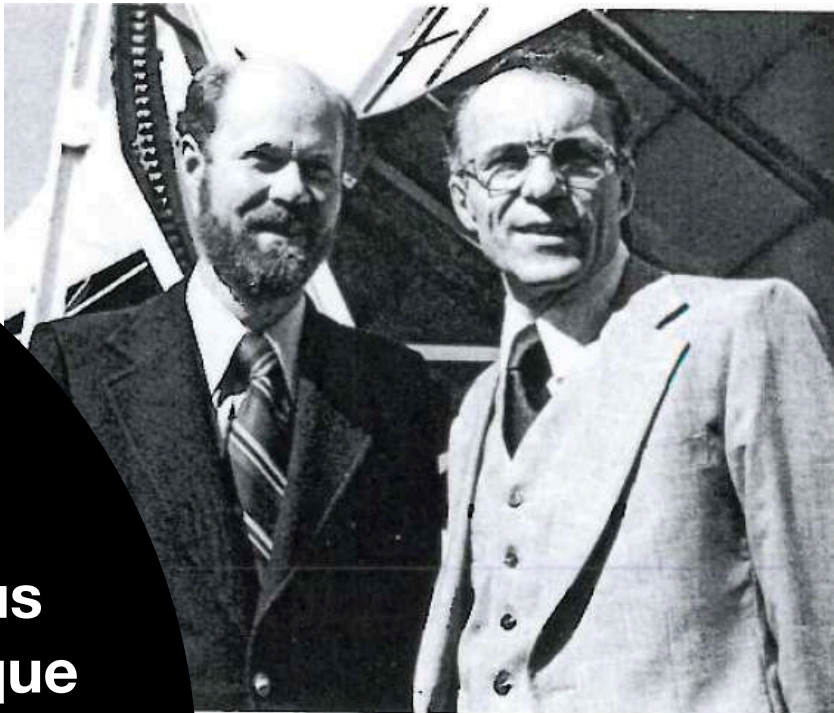
$$\begin{array}{c} 10^{12-14} \\ \hline \mathbf{d} \end{array} = \begin{array}{c} \mathbf{\Lambda}(\gamma) \end{array} \begin{array}{c} \mathbf{s}(\mathbf{r}) \\ \hline 10^7 \end{array} + \begin{array}{c} \mathbf{n} \end{array}$$

en conclusion

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



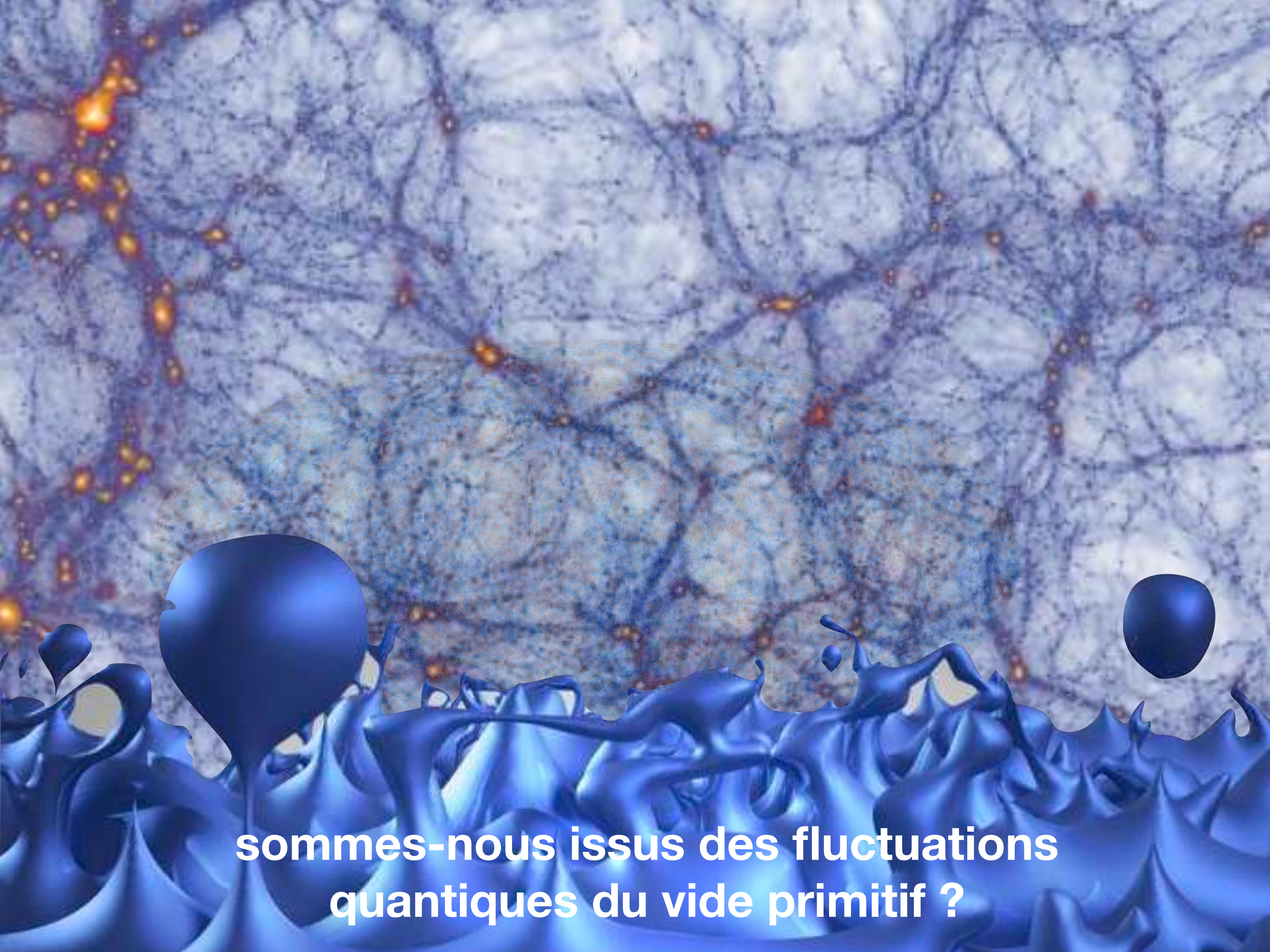
Loi de Hubble-Lemaître



Penzias et Wilson



Gamow, Alpher, Hermann



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



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*



POLARBEAR / ACT / Simons Array / CLASS / Simons Observatory

