Observer l’infiniment grand

Rencontres d'été de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit : 2018 promotion Chien-Shiung Wu

Josquin Errard (APC - CNRS)

juillet 2018

josquin@apc.in2p3.fr

Le laboratoire APC a été créé en **2005** à l'occasion de la refondation de l'Université Paris 7 sur le campus de Paris-Rive Gauche. APC rassemble **75 chercheurs permanents**, et plus de **soixante ingénieurs, techniciens et administratifs**. En incluant les personnels non permanents (doctorants, boursiers postdoctoraux), ce sont quelques **200 personnes** qui forment cette structure, pilotée outre **l'Université Paris Diderot** par le CNRS (représenté par trois de ses Instituts : principalement **l'IN2P3**, mais aussi **l'INSU** et **l'INP**), le **CEA** (DSM/IRFU) et l'**Observatoire de Paris**.

Cosmologie "fortement impliqué dans la mission spatiale **PLANCK** et les expériences **QUBIC** et **POLARBEAR** au sol et les observations à grand champ permettant de mieux appréhender l'énergie noire (relevé grand champ BOSS/eBOSS , télescope **LSST**, mission spatiale **EUCLID**). En février 2010, George Smoot , prix Nobel 2006, a été recruté par l'Université Paris-Diderot dans le laboratoire APC. APC entretient des contacts étroits avec le Centre de Cosmologie Physique de Paris (**PCCP**) que George Smoot a entrepris de développer à Paris"

Gravitation La recherche d'ondes gravitationnelles, tant au sol avec l'interféromètre **VIRGO** que dans l'espace avec LISAPathfinder préparation de l'interféromètre spatial **LISA**, est un autre champ d'étude prioritaire important au laboratoire.

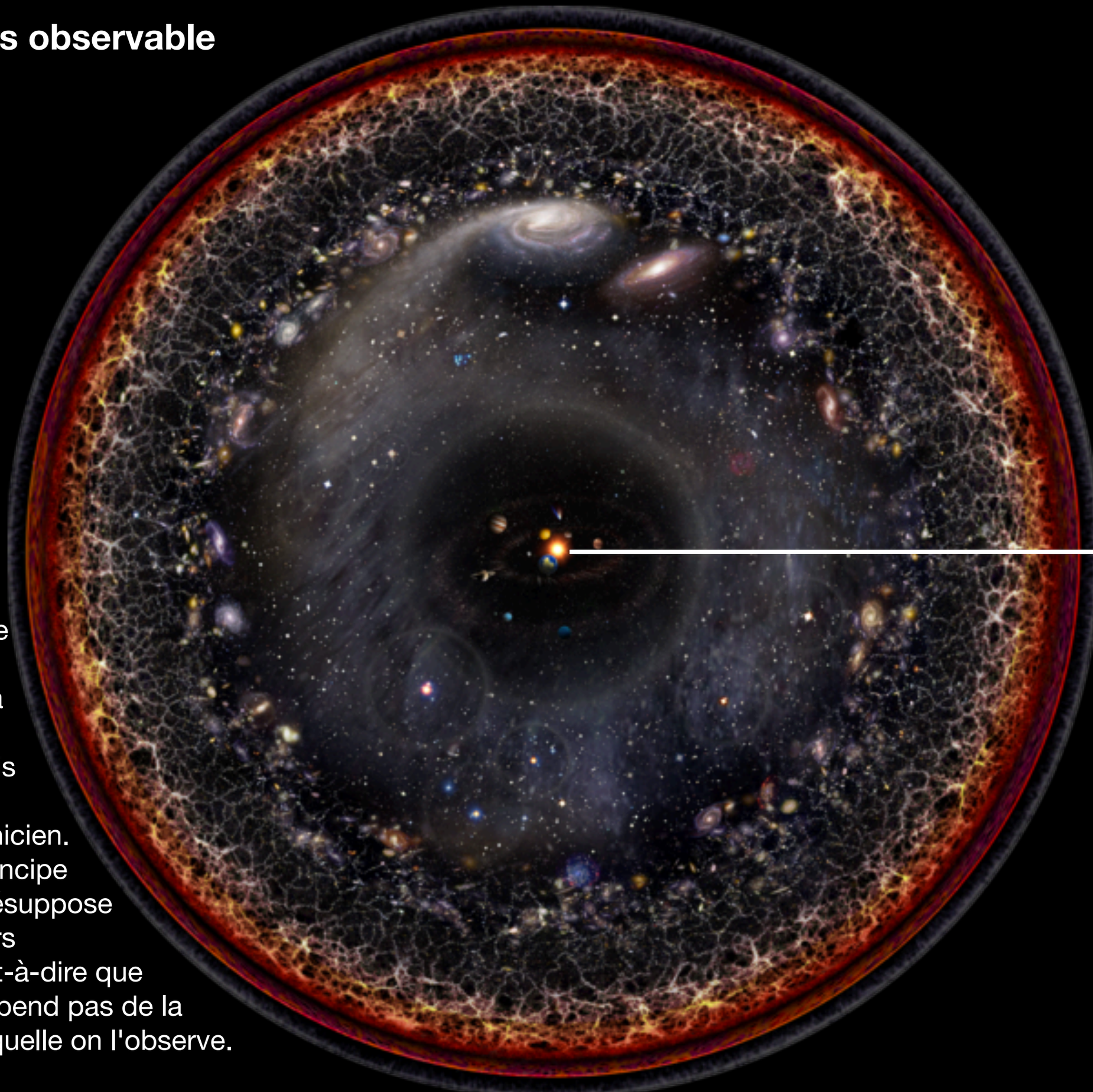
Astrophysique de haute énergie : les phénomènes violents dans l'Univers sont étudiés afin de mieux comprendre les processus physiques qui modulent la formation des structures cosmiques. Le laboratoire est fortement impliqué dans l'observation des **rayons X (SVOM, ATHENA)** et **gamma (INTEGRAL, TARANIS, HESS-CTA)**, des **rayons cosmiques de ultra-haute énergie (JEM-EUSO)** et des **neutrinos (ANTARES-Km3Net/ORCA)**.

Neutrinos : ces particules extrêmement légères interagissent très peu avec la matière et sont donc d'irremplaçables messagers des phénomènes qui se passent à des distances cosmiques de nous. L'étude de leurs propriétés est donc importante pour le domaine des astroparticules. Le laboratoire est fortement impliqué dans une identification complète du **phénomène d'oscillation (DoubleCHOOZ, LBNO/ WA105 and CeSOX)**. Des chercheurs du groupe sont également impliqués dans la recherche directe de matière noire **DarkSide**.

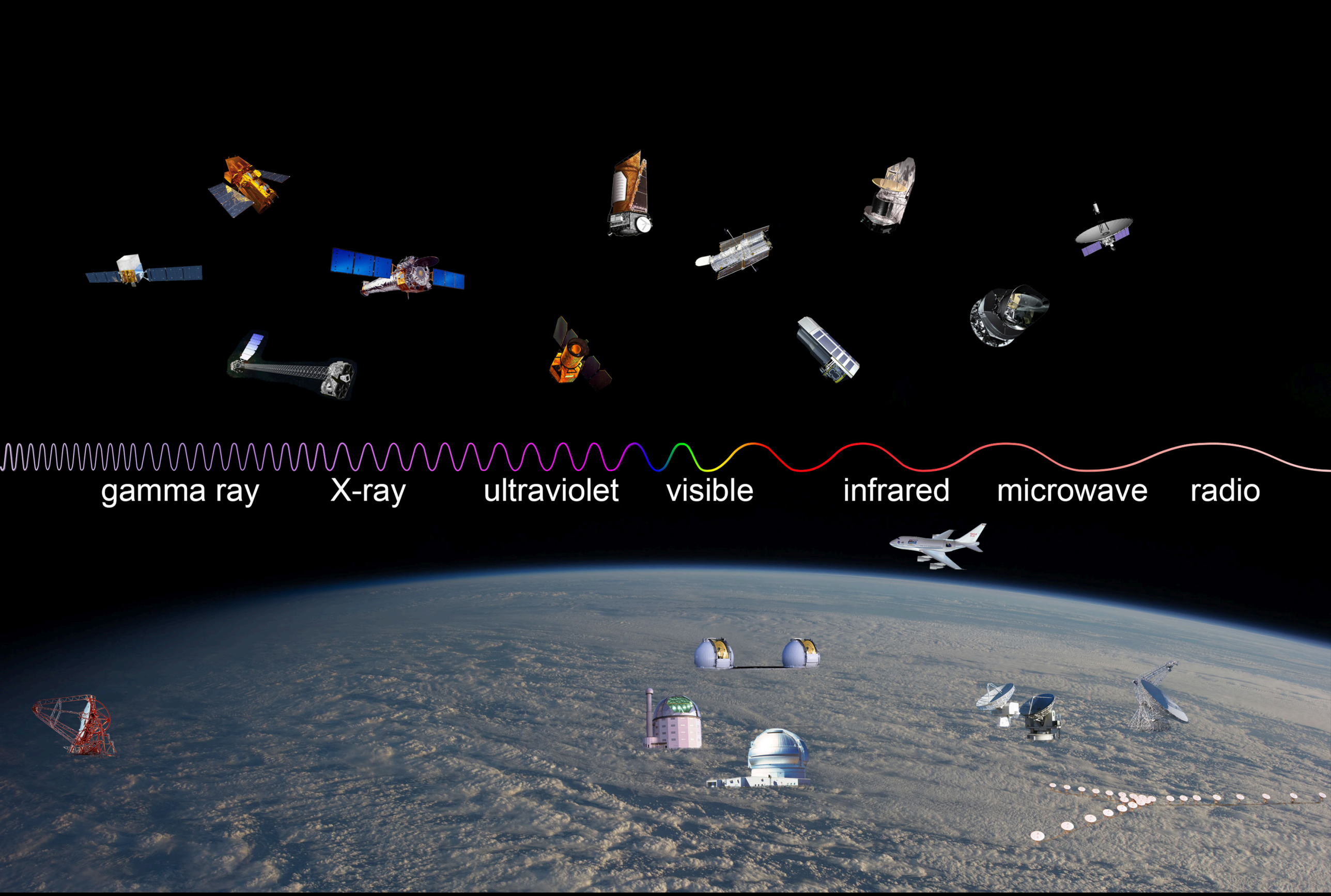
Théorie depuis les fondements de la relativité générale et des théories d'unification, telles que la théorie des cordes et des branes, jusqu'à la compréhension des phénomènes d'accélération cosmique, la phénoménologie des particules cosmiques de haute énergie et la physique des neutrinos.

POLARBEAR telescope
5,200m, Atacama desert, Chile

notre univers observable

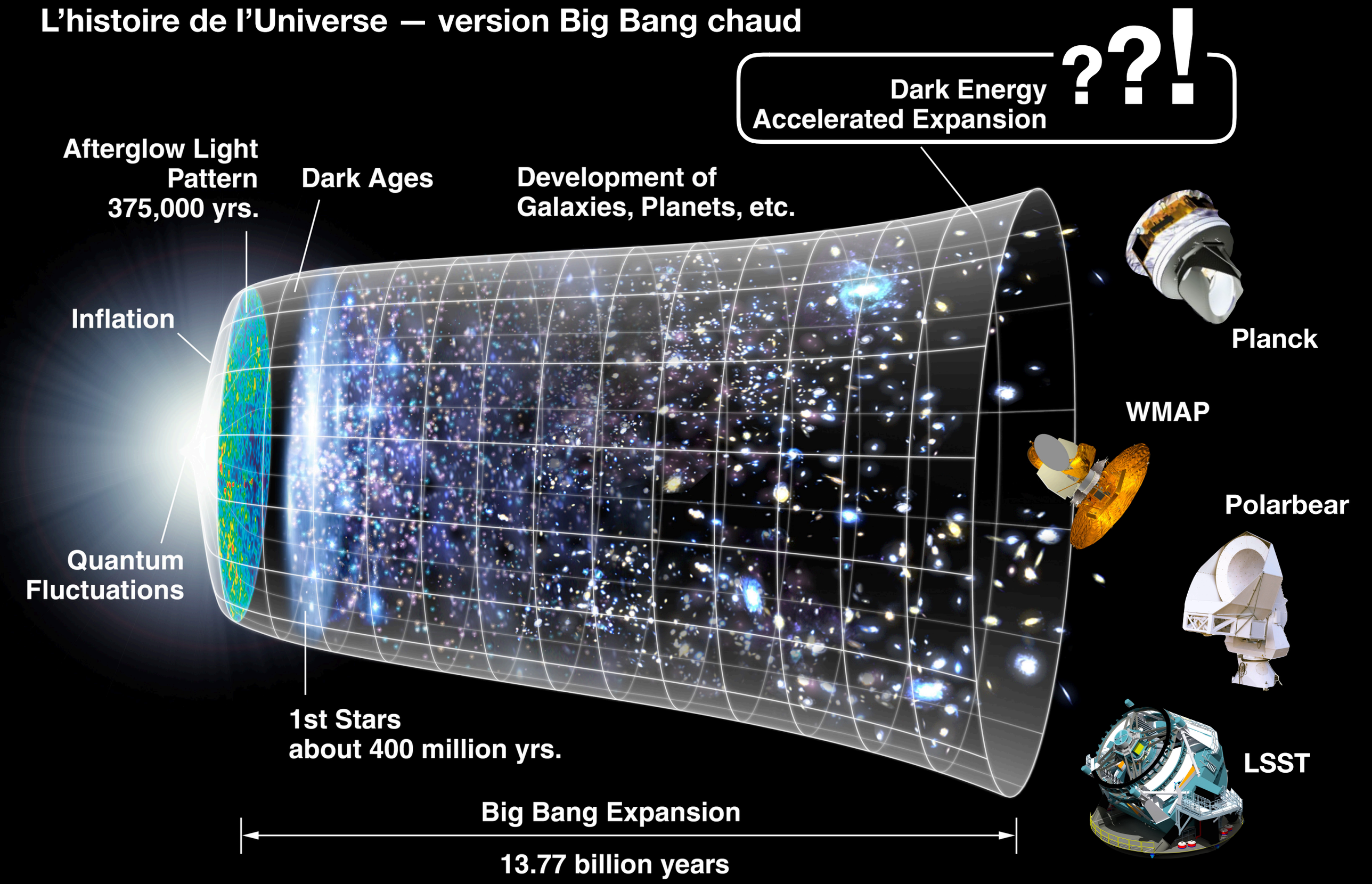


Principe cosmologique : l'Homme n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, en opposition avec la théorie géocentrique, mais en accord avec le principe copernicien. En pratique, le principe cosmologique présuppose aussi que l'Univers est isotrope, c'est-à-dire que son aspect ne dépend pas de la direction dans laquelle on l'observe.


gamma ray
X-ray
ultraviolet
visible
infrared
microwave
radio

Radio
Microwave
Infrared
UV
X-Ray
Gamma Ray
Radio
60,000 nm
600 K
Infrared
1200-800 nm (10-3.6 um)
4,500 K
Optical
450-750 nm
6,000 K
Ultraviolet
400-200 nm
10,000 K
X-ray
100-10 nm
10,000,000 K
Multiwavelength Whirlpool Galaxy
COLD GAS: Radio waves reveal regions of gas cool enough for CO_2 molecules to exist.
COOL STARS: Infrared shows smaller cool red stars that make up most of the galaxy.
SOLAR STARS: Optical light comes from stars around the size of the Sun.
HOT STARS: Ultraviolet shows the larger hot blue stars that are less frequent in galaxies.
HOT GAS: X-rays are emitted from the hottest regions of gas where atoms are ionized.
COOL LOW ENERGY RADIATION
VISIBLE LIGHT
HOT HIGH ENERGY RADIATION

L'histoire de l'Universe — version Big Bang chaud



1. Modèle de Big Band Chaud
2. Observation du fond diffus cosmologique
3. Les problèmes observationnels d’aujourd’hui, les solutions de demain

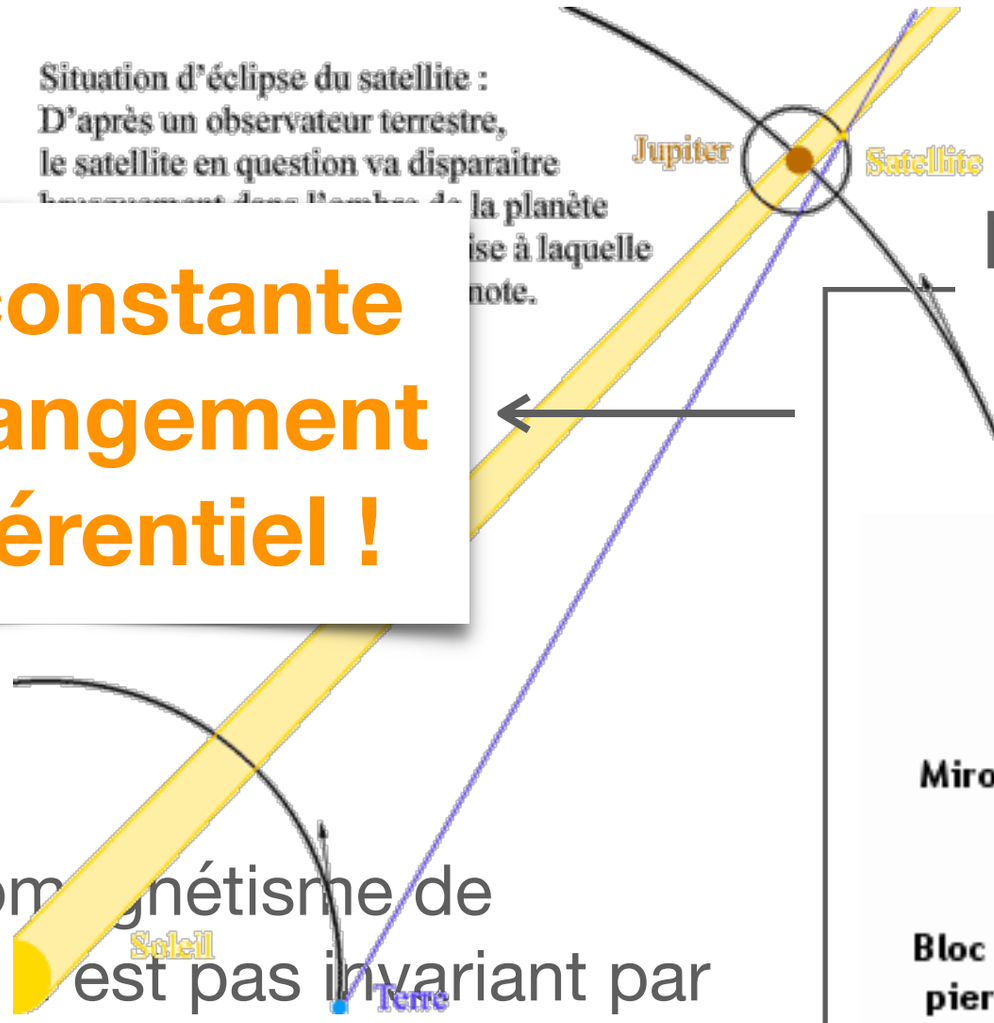
Limites de la relativité galiléenne

Rømer (1667) — la vitesse de la lumière est finie

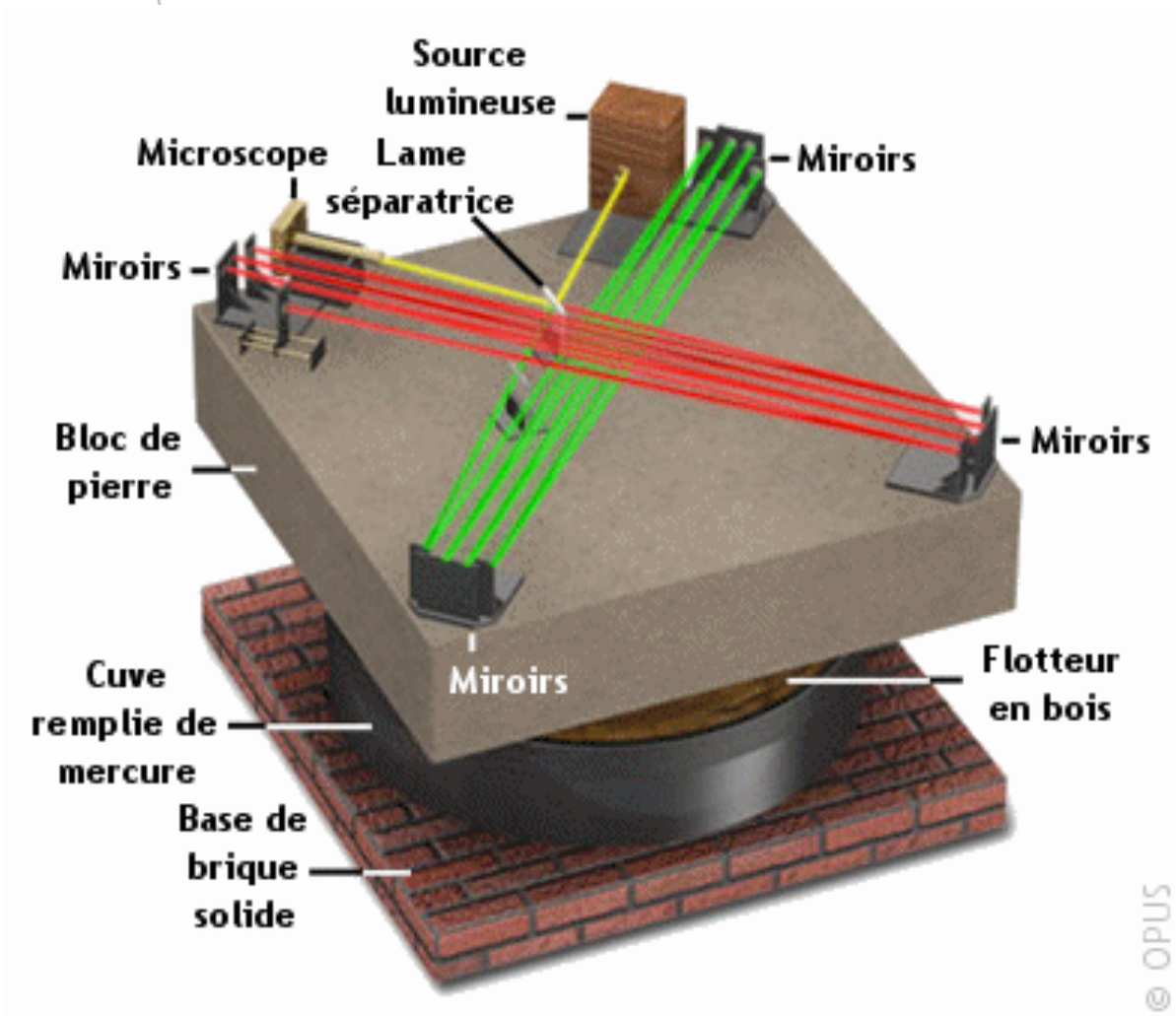
↓

Michelson & Morley (1887)

constatation que “c+u=c”!
vérifié en 2007 à 10^{-17} près



c est constante par changement de référentiel !



- l’électromagnétisme de Maxwell n’est pas invariant par changement de référentiel galiléen
- le rapport e/m pour l’electron diminue avec la vitesse …

Deux attitudes possibles

1) réparer la théorie de l'Ether sans cadre théorique rigoureux

2) admettre que la vitesse de la lumière est indépendante du référentiel
→ mécanique galiléenne est erronée

"Sur l'électrodynamique des corps en mouvements" (1905)

Extension du postulat de la relativité par Einstein

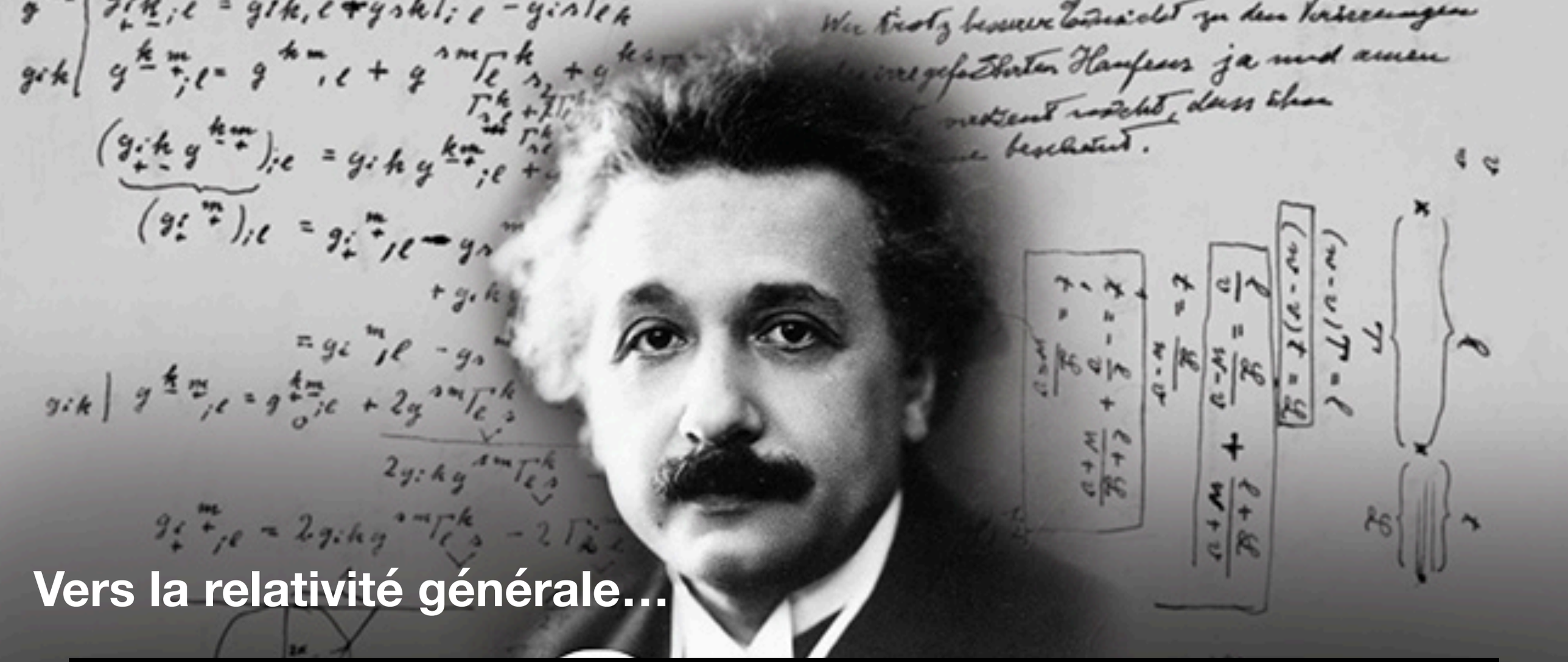
“Il existe une classe de référentiels privilégiés, en translation uniforme les uns par rapport aux autres, dans lesquels ***toutes*** les lois de la physique prennent la même forme.”

mécanique + électromagnétisme + etc.

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



Vers la relativité générale…

relativité restreinte

+

principe d'équivalence

la masse gravitationnelle est la même que la masse inertielle

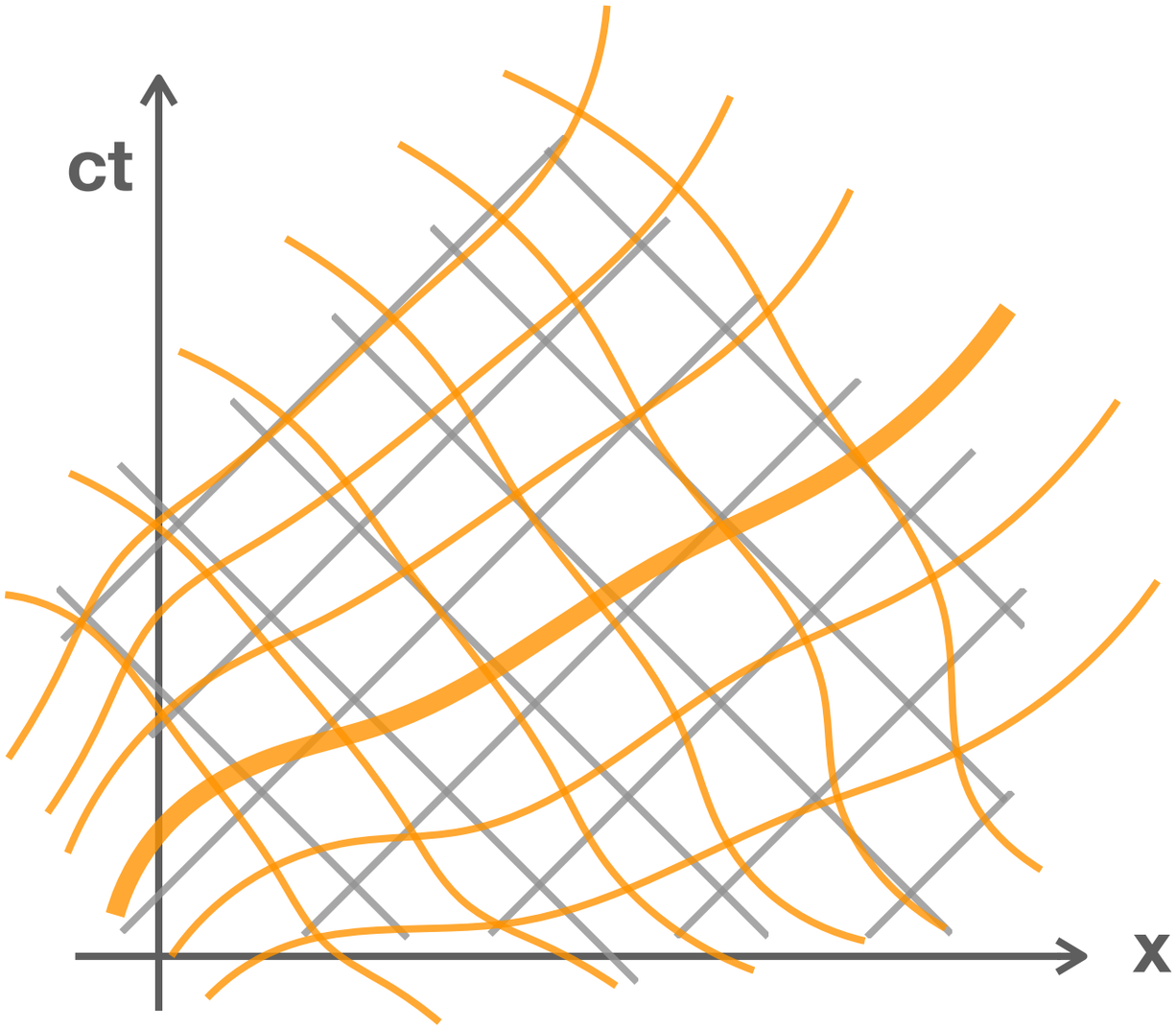
Dans un référentiel inertiel, les lois de la relativité restreinte sont correctes.
Dans un champ de gravitation, un référentiel en chute libre est **localement** un référentiel inertiel

On réalise une expérience dans un référentiel en chute libre

$\updownarrow$ ***équation des géodésiques***

On change de coordonnées pour revenir au référentiel accéléré — par exemple, sur Terre, avec une accélération g

De Minkowski à l'espace-temps courbé



$$(ds)^2 = \sum_{\mu,\nu} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$dx^\alpha = \frac{\partial x^\alpha}{\partial \xi^\mu} d\xi^\mu$$

$$(ds)^2 = \sum_{\mu,\nu,\alpha,\beta} \eta_{\alpha\beta} \underbrace{\frac{\partial x^\alpha}{\partial \xi^\mu} \frac{\partial x^\beta}{\partial \xi^\nu}}_{\equiv g_{\mu\nu}} d\xi^\mu d\xi^\nu$$

$$(ds)^2 = \sum_{\mu,\nu} g_{\mu\nu} d\xi^\mu d\xi^\nu$$

- $g_{\mu\nu}$ relie les coordonnées au temps propre (qui joue le rôle de distance)
- $g_{\mu\nu}$ correspond à 10 fonctions indépendantes
- si on connait $g_{\mu\nu}$, alors on peut calculer les géodésiques

$$x^\mu(s) : \frac{d^2 x^\mu}{ds^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{ds} \frac{dx^\beta}{ds}$$

équations d'Einstein

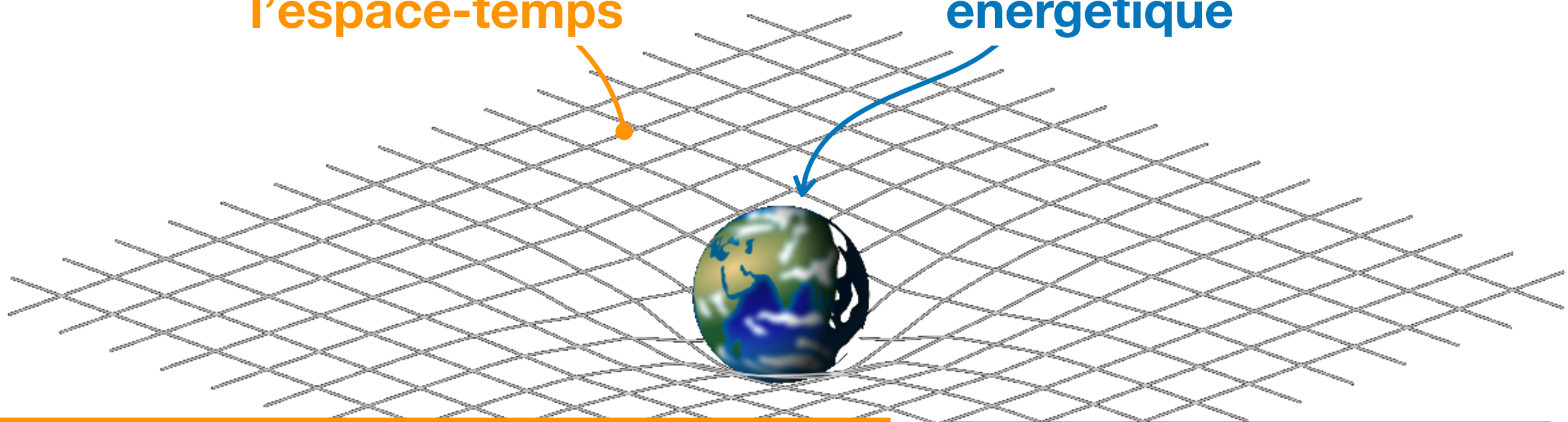
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R_{\alpha\beta} = R^{\rho}{}_{\alpha\rho\beta} = \partial_\rho \Gamma^{\rho}{}_{\beta\alpha} - \partial_\beta \Gamma^{\rho}{}_{\rho\alpha} + \Gamma^{\rho}{}_{\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\beta\alpha} - \Gamma^{\rho}{}_{\beta\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\rho\alpha}$$
$$= 2\Gamma^{\rho}{}_{\alpha[\beta,\rho]} + 2\Gamma^{\rho}{}_{\lambda[\rho}\Gamma^{\lambda}{}_{\beta]\alpha}.$$

$$T^{\mu\nu} = \left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) u^\mu u^\nu - p g^{\mu\nu}$$

géométrie de l'espace-temps

contenu énergétique



- fonction de $g_{\mu\nu}$ et de ses dérivées
- description de la trajectoire des particules

- 10 equations couplées et non-linéaires

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

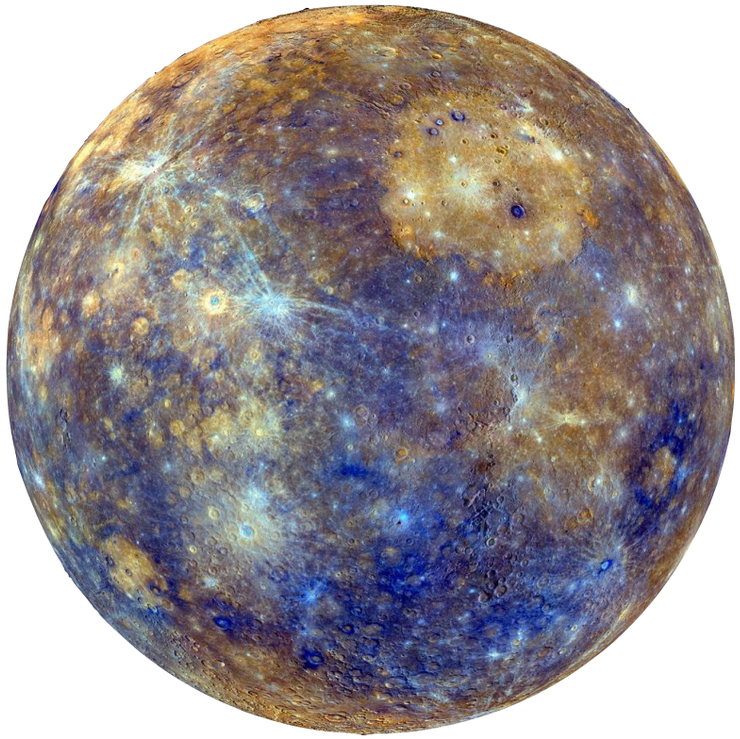
la constante cosmologique

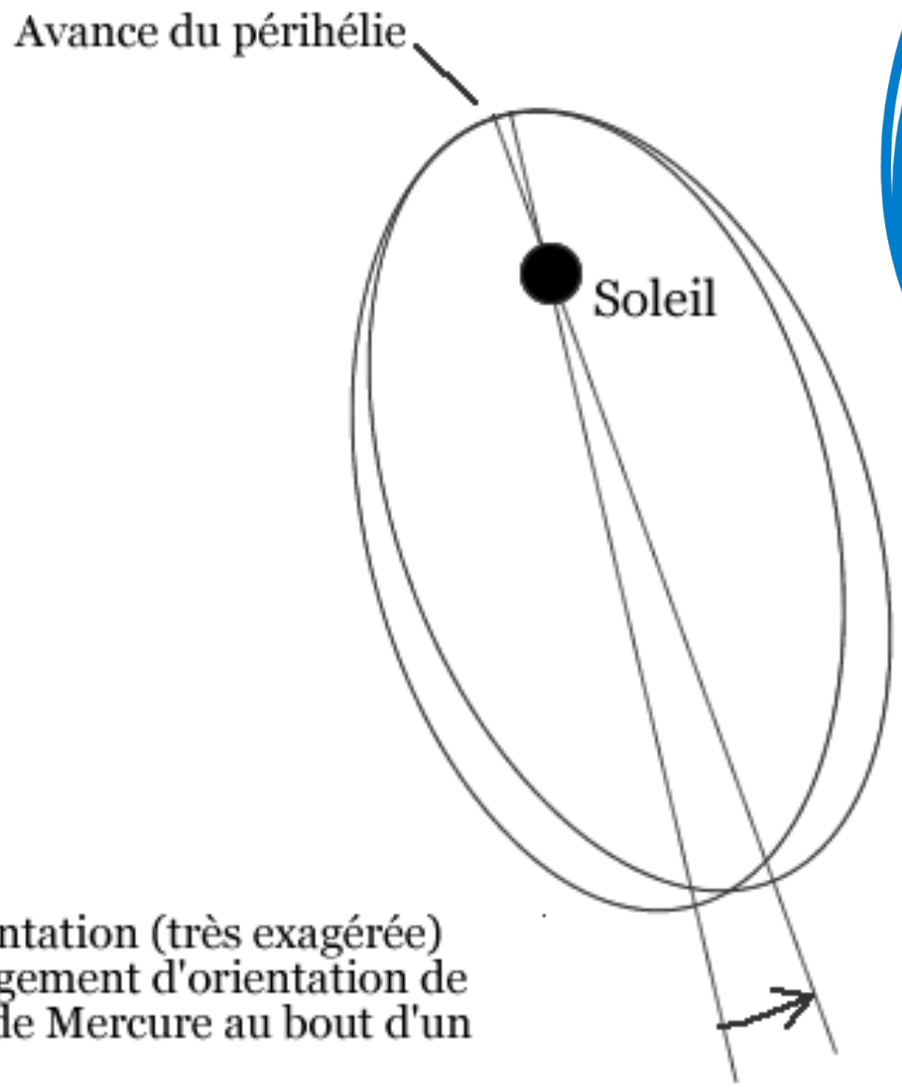
La limite Newtonienne est affectée par cet ajout :

$$\vec{F}_g = -\frac{GM}{r^2}\vec{u_r} + \boxed{\frac{\Lambda c^2 r}{3}\vec{u_r}}$$

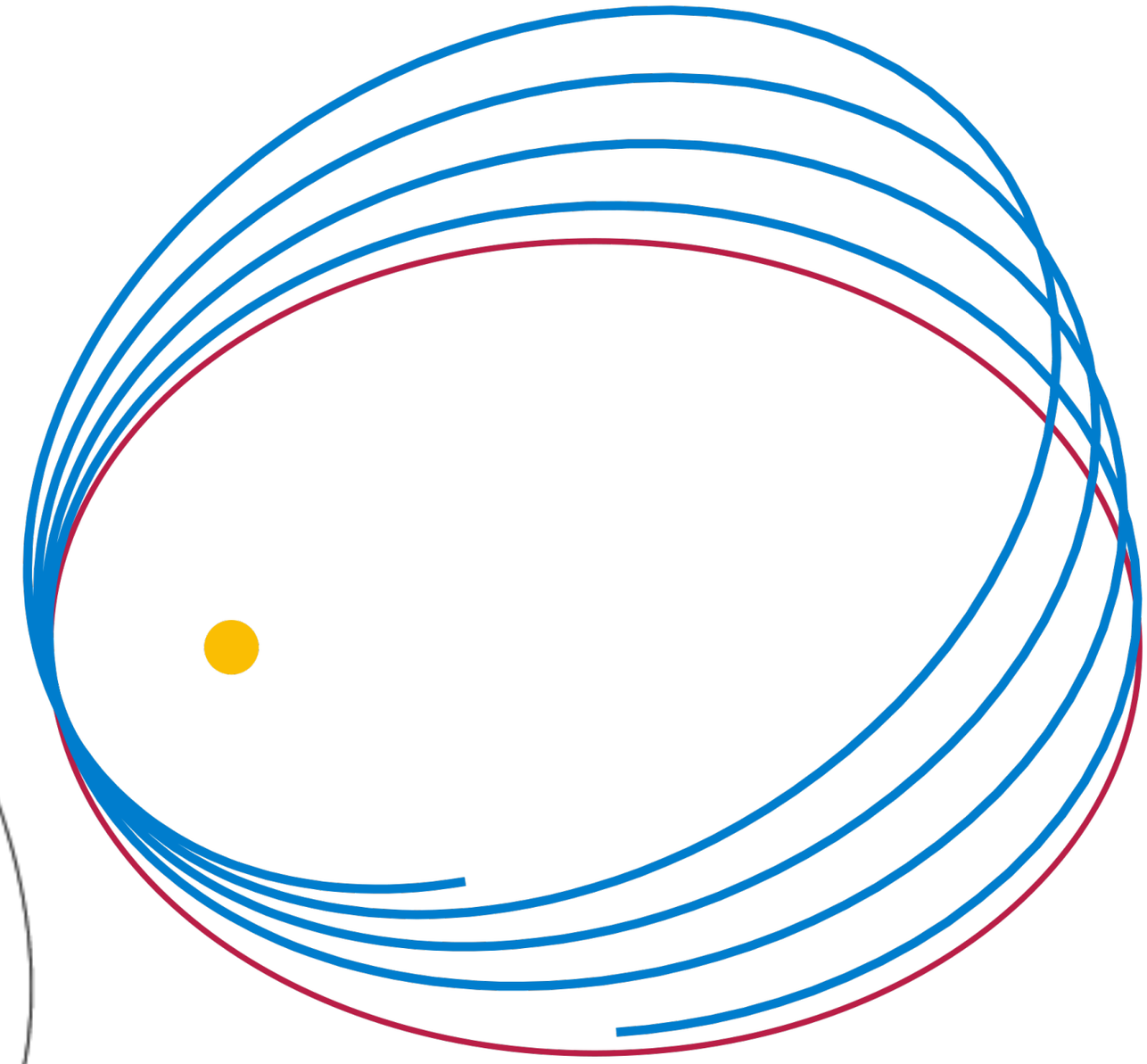
Force repulsive qui accroit avec la distance !

Avance du périhélie de Mercure



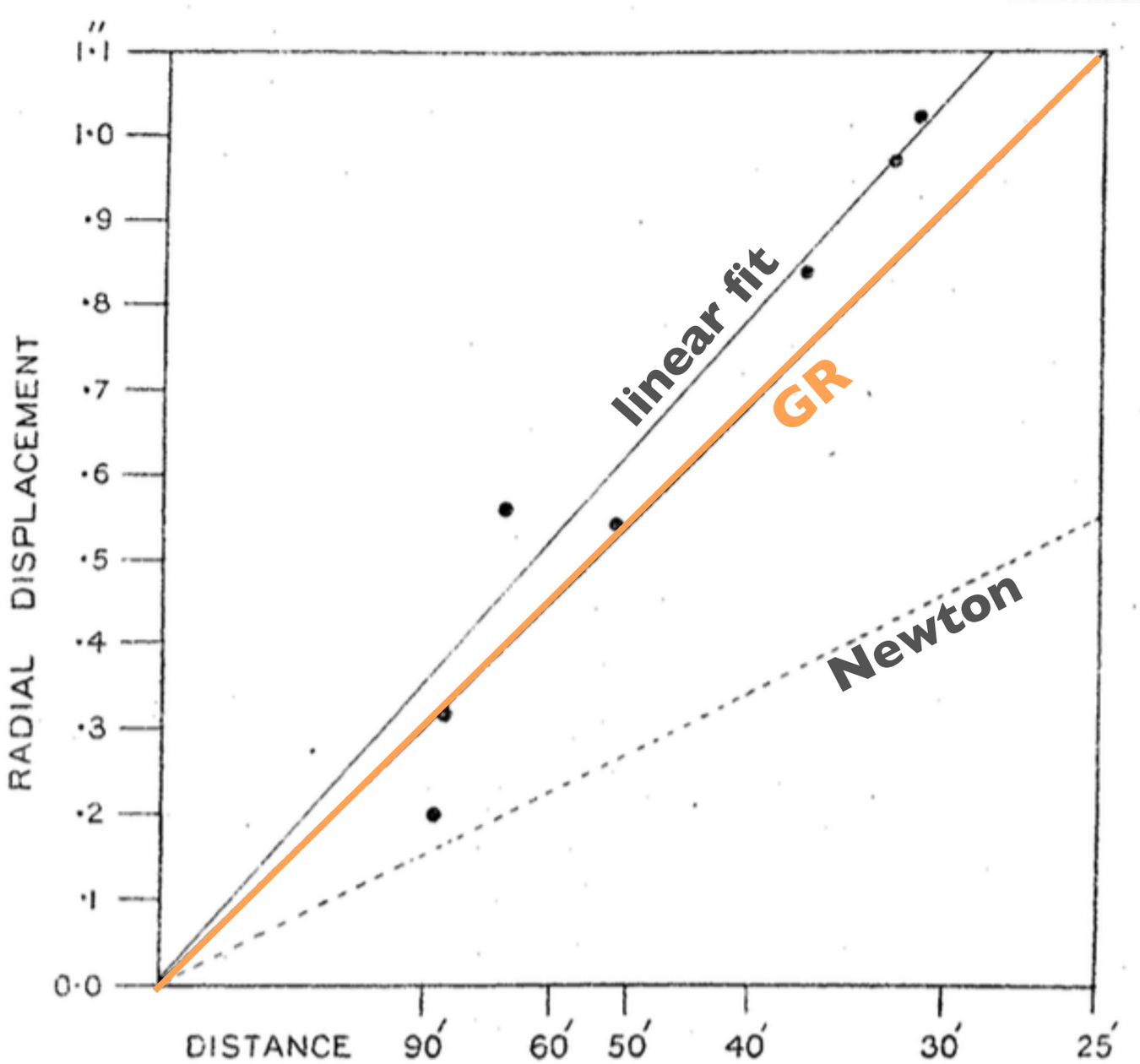


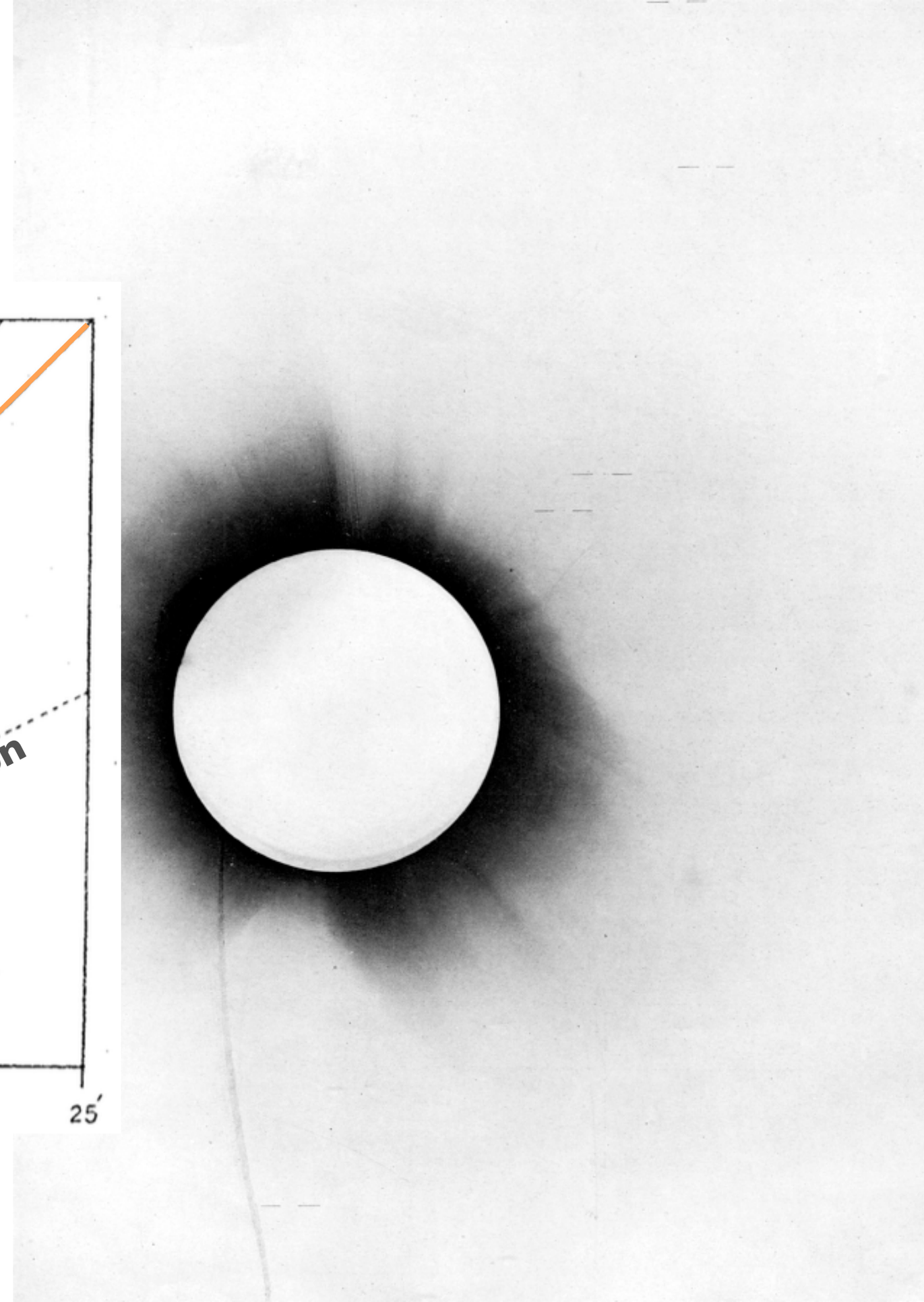
Représentation (très exagérée) du changement d'orientation de l'orbite de Mercure au bout d'un siècle



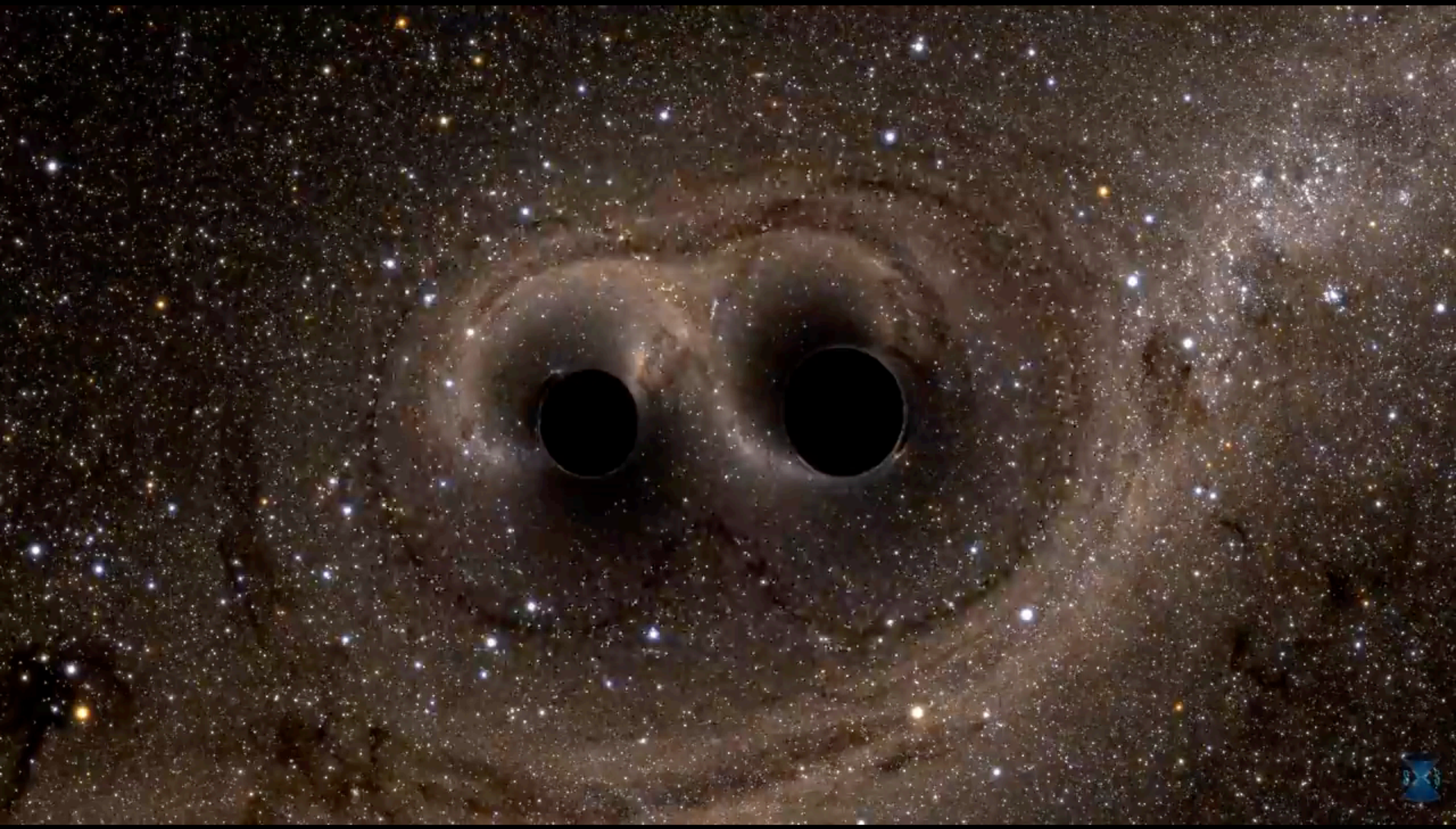
Première evidence observationnelle

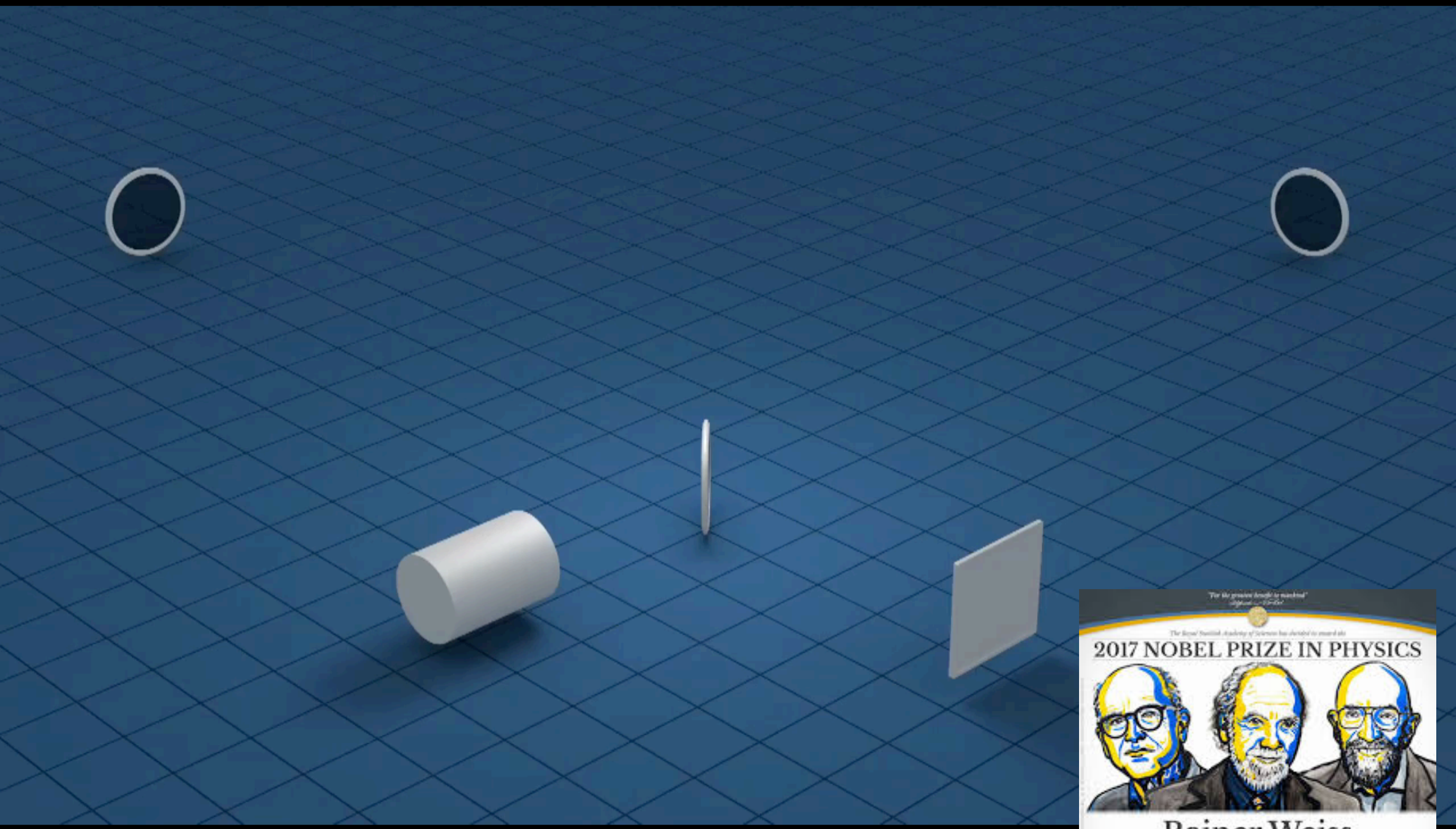
Dyson, Eddington and Davidson (1919)

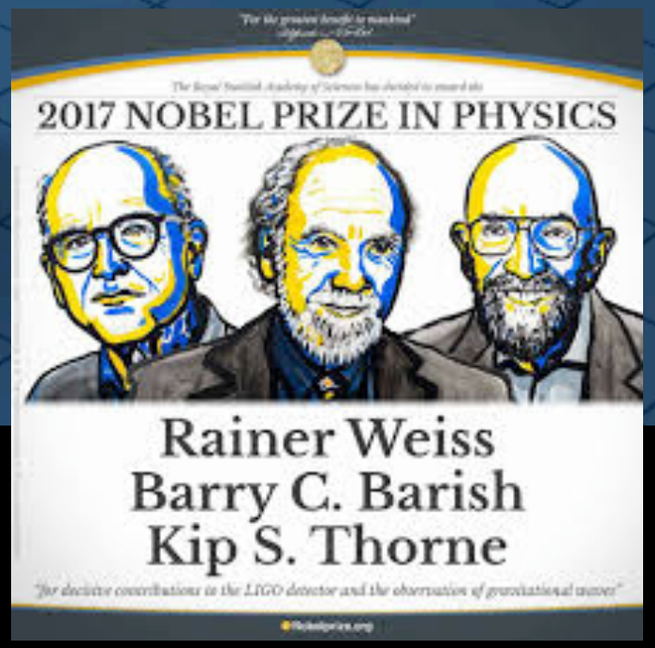




… plus récemment en 2015 …





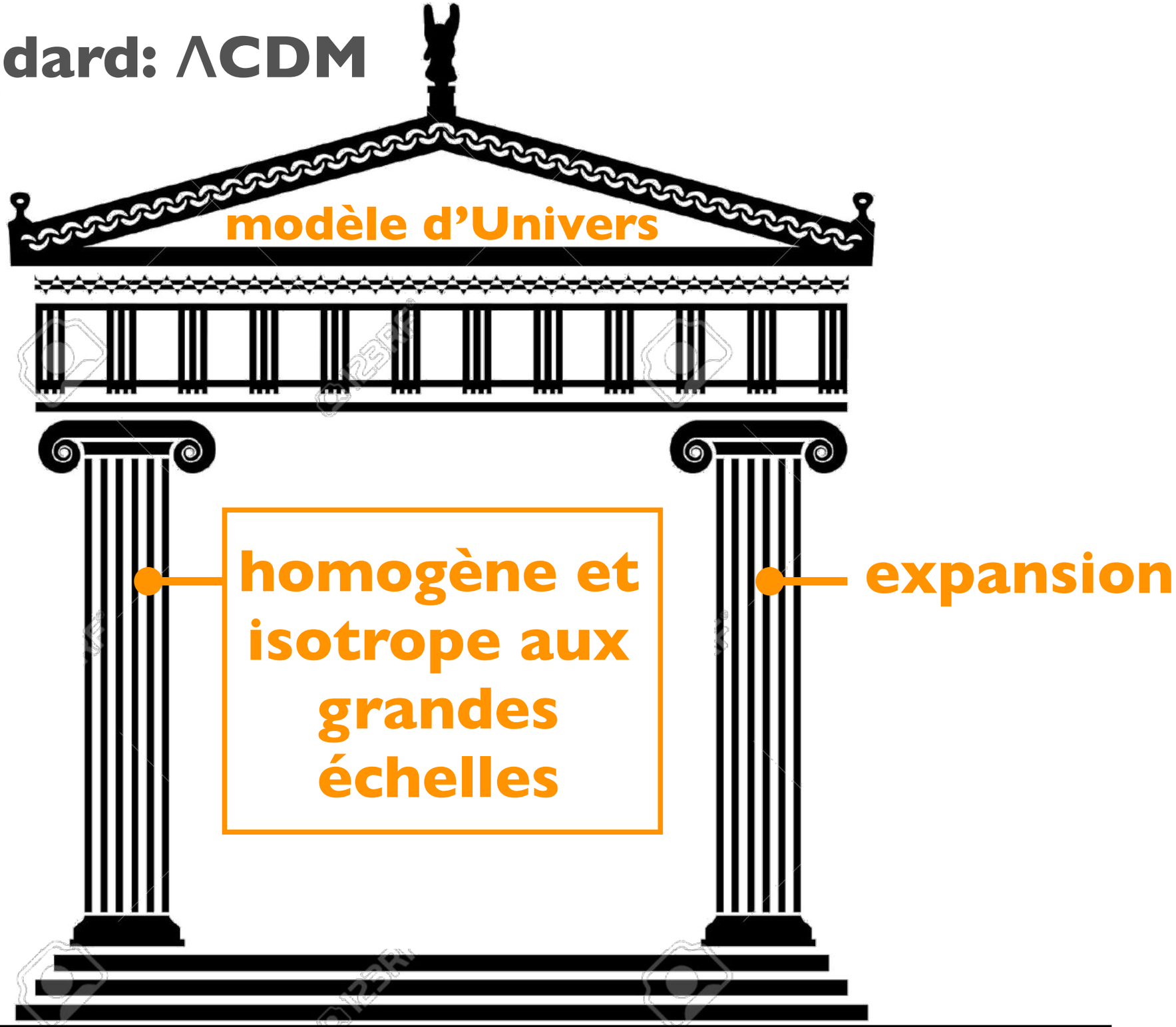

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

Relativité
Générale

↓

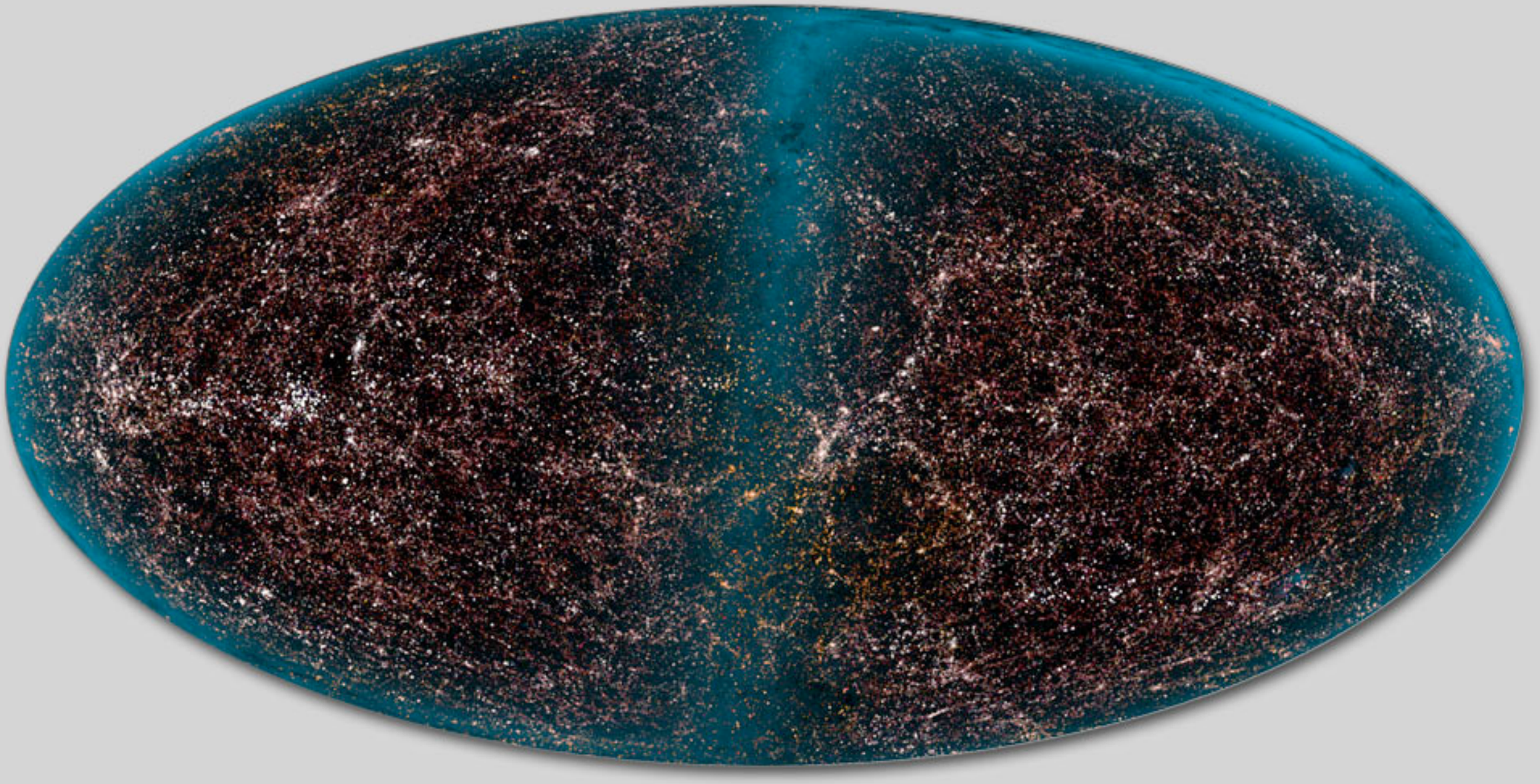
Modèle standard
de la cosmologie

modèle standard: ΛCDM



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

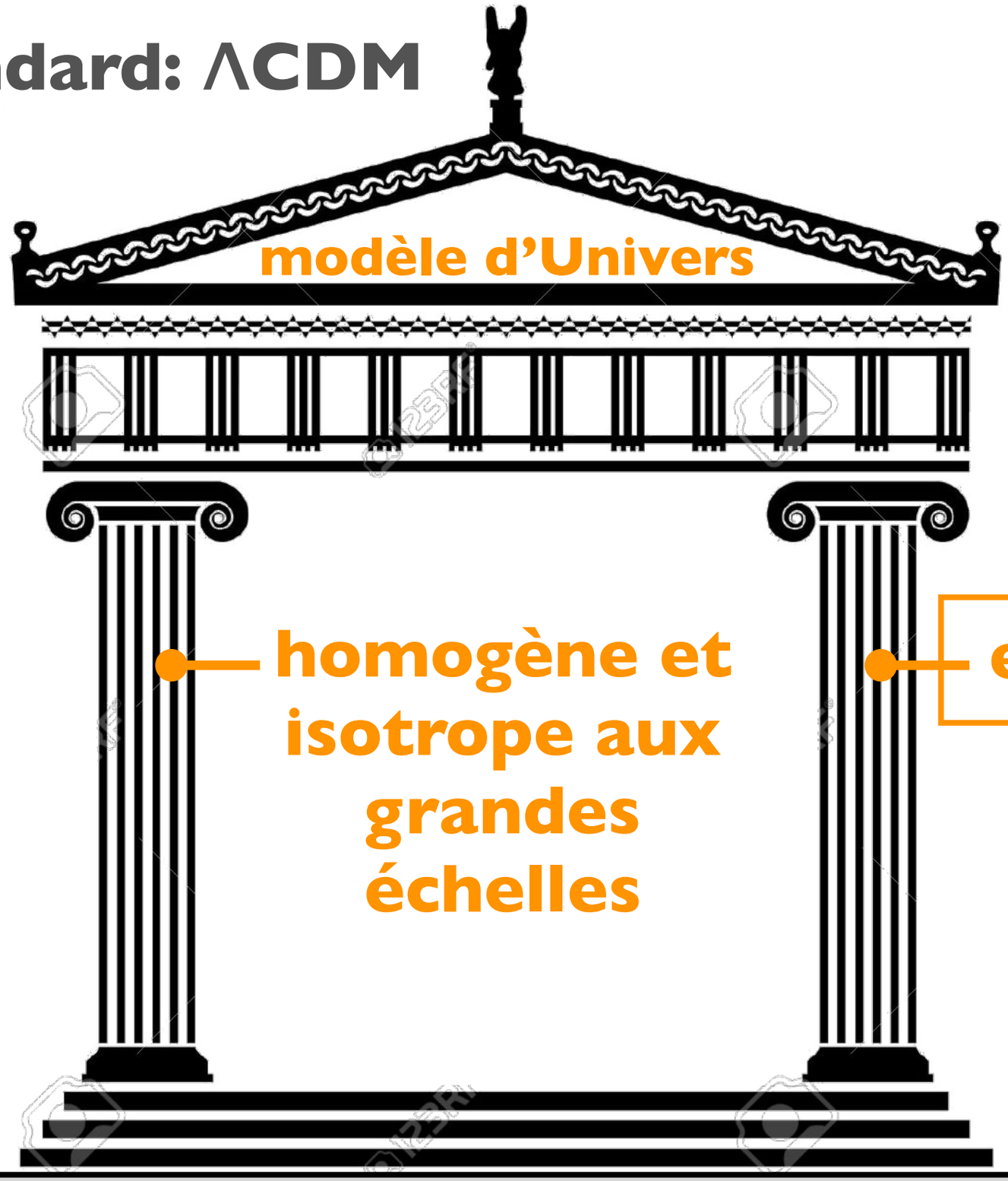
L'Univers est homogène aux grandes échelles



Two Micron All Sky Survey Image Mosaic: Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & University of Massachusetts

L’Univers est homogène aux grandes échelles

modèle standard: ΛCDM



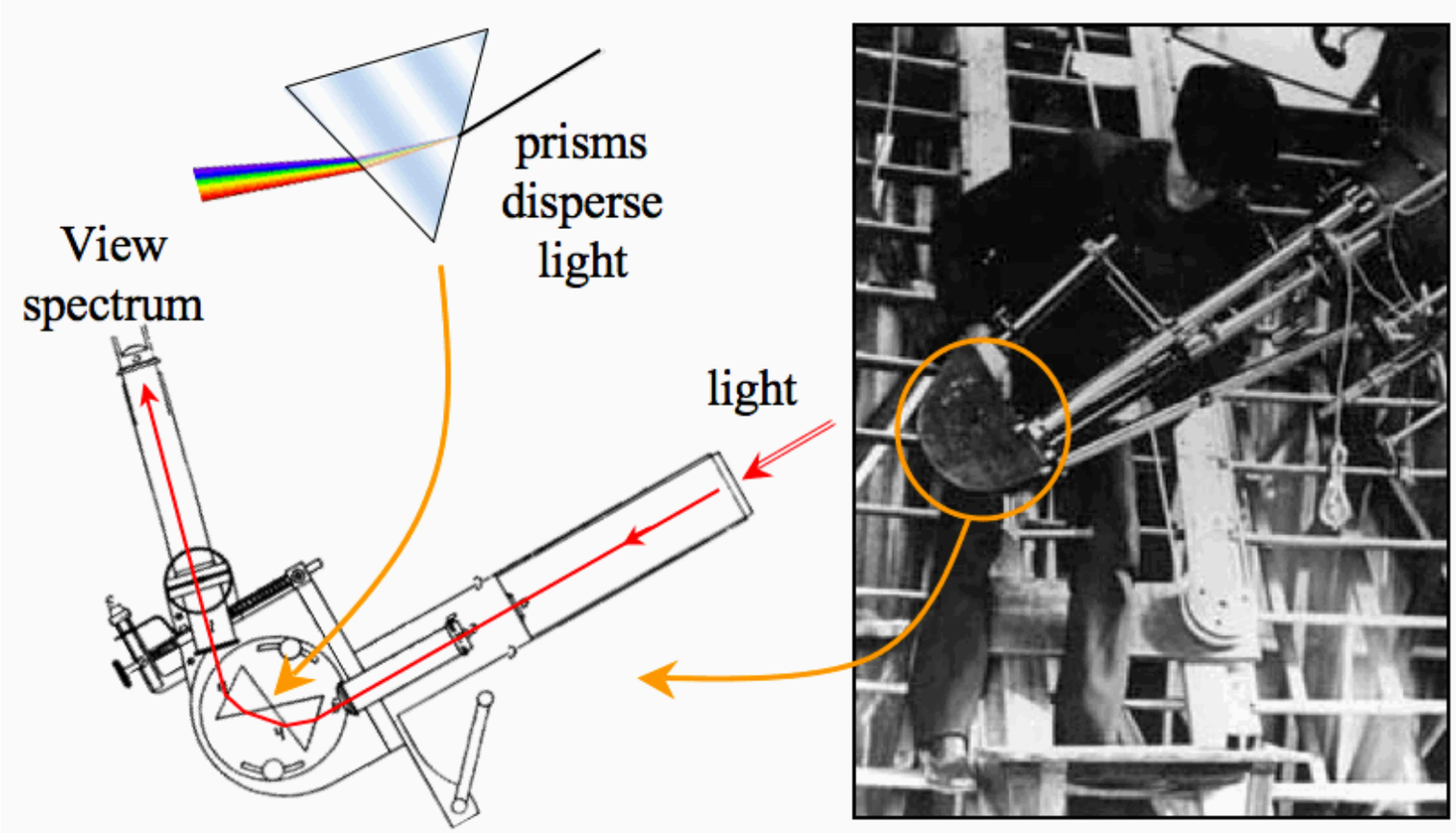
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

L’Univers est en expansion

Une **céphéide** est une étoile variable, géante ou supergéante jaune, de 4 à 15 fois plus massive que le Soleil et de 100 à 30 000 fois plus lumineuse, dont l'éclat varie de 0,1 à 2 magnitudes selon une période bien définie, comprise entre 1 et 135 jours, d'où elle tire son nom d'étoile variable. Elles ont été nommées d'après le prototype que constitue l'étoile δ de la constellation de Céphée.

Une relation entre période et luminosité intrinsèque pour les Céphéides classiques a été découverte en 1908 par **Henrietta Swann Leavitt**, grâce à l’étude de milliers d’étoiles variables dans les Nuages de Magellan.

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921)



A two-prism spectrograph

Vesto Slipher & spectrograph

Vesto Melvin Slipher
(1875-1969)

- **1913 :** première mesure de vitesse radiale d'une nébuleuse spirale (M31), **-** 300 km/s
- **1915 :** mesure des vitesses radiales de 15 nébuleuses spirales, 13 sont positives, avec une vitesse moyenne de 400 km/s (~ 25 x la vitesse moyenne des étoiles d'une galaxie)
- **1917 :** mesure des vitesses radiales de 25 nébuleuses spirales, 21 sont positives

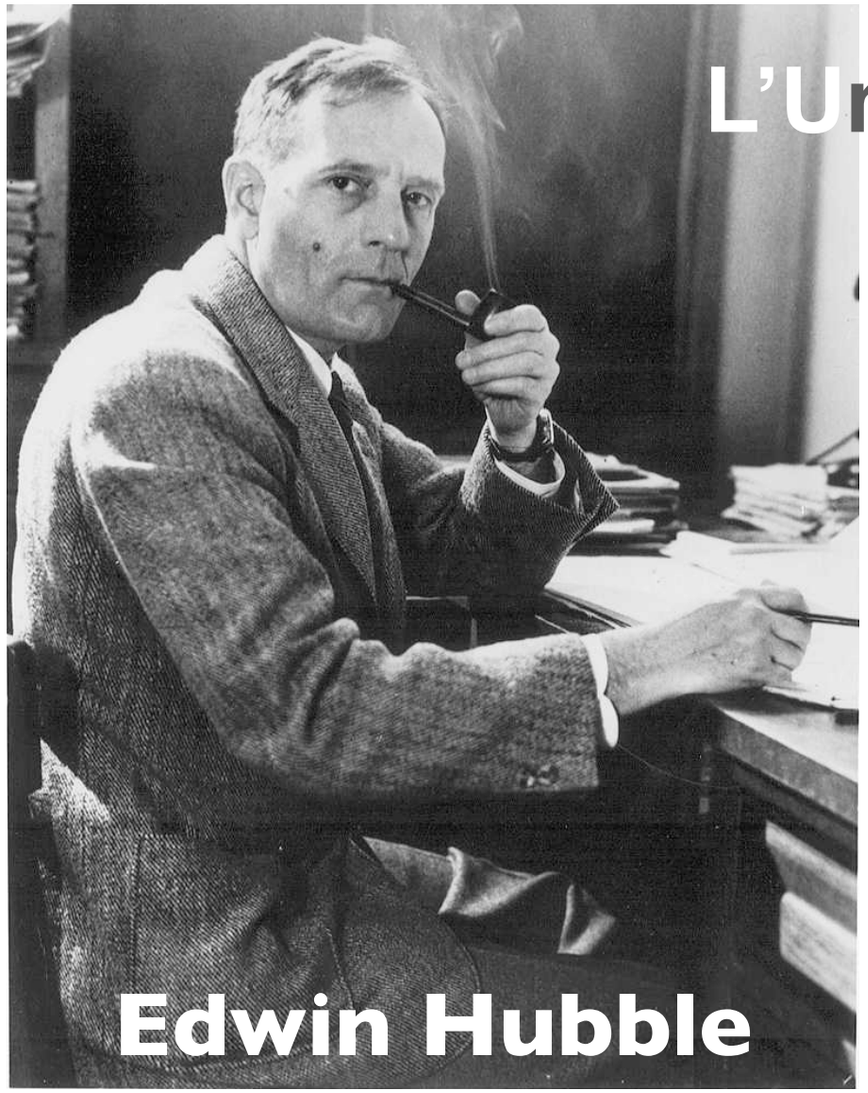
> *"It has for a long time been suggested that the spiral nebulae are stellar systems seen at great distances. This is the so-called "island universe" theory, which regards our stellar system and the Milky Way as a great spiral nebula which we see from within. This theory, it seems to me, gains favor in the present observations."*

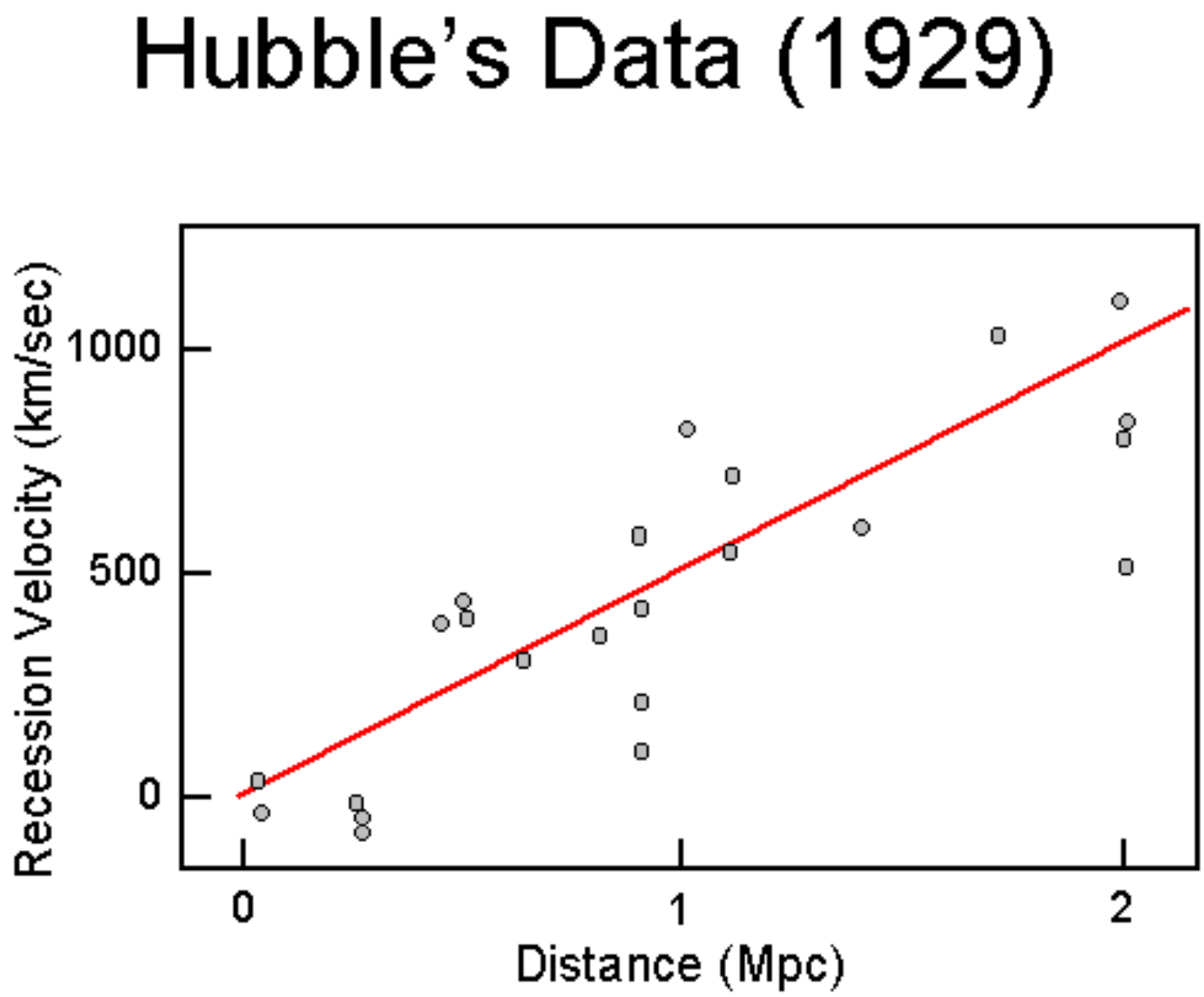
Mont Wilson à Los Angeles

mesure des distances grâce aux Céphéides

décalage vers le rouge des nébuleuses

L'Univers est en expansion



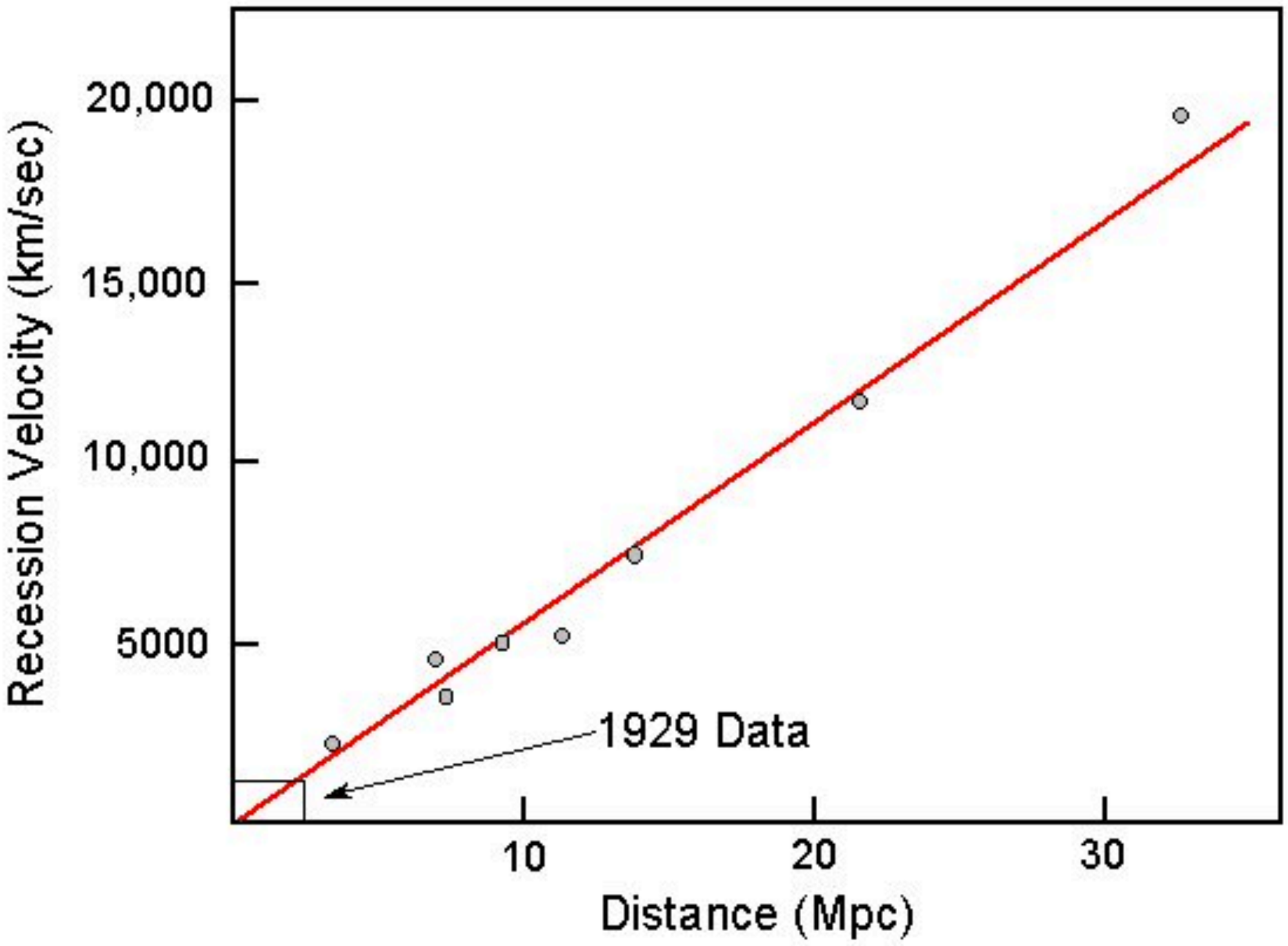


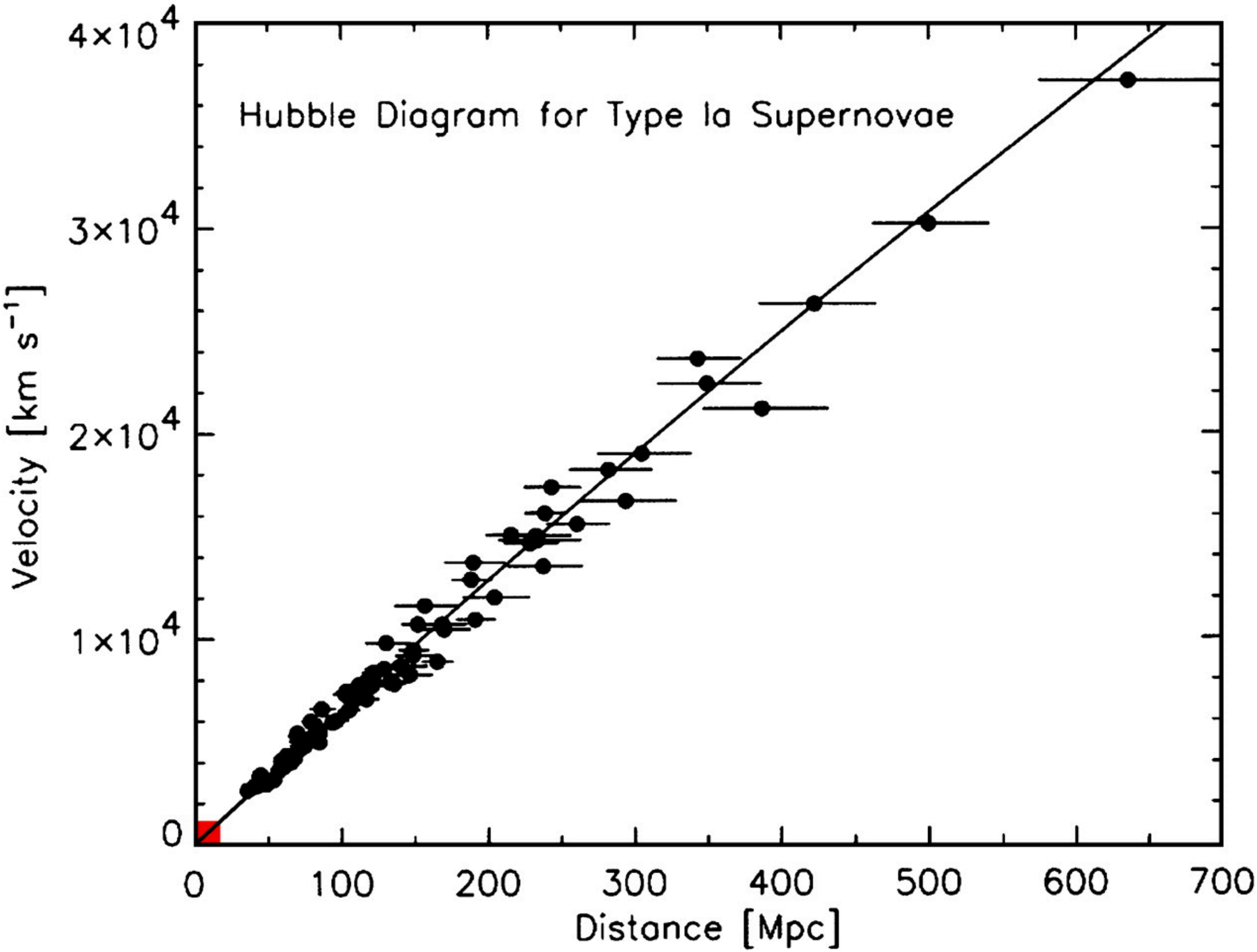
$$v = H_0 \times d$$

constante de Hubble

$\mathrm{km.s^{-1}.Mpc^{-1}}$

Hubble & Humason (1931)




Hubble Diagram for Type Ia Supernovae
Velocity [km s^{-1}]
4×10^4
3×10^4
2×10^4
1×10^4
0
0
100
200
300
400
500
600
700
Distance [Mpc]

Alexandre Friedmann
(1888-1925)

On revient aux équations d'Einstein

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

+ homogeneité et isotropie de l'Univers aux grandes échelles

→ les équations de Friedmann

courbure de l'Univers

constante cosmologique

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

taux d'accélération d'expansion de l'Univers

taux d'expansion de l'Univers

densité d'énergie et pression des composants de l'Univers

Le contenu de l'Univers

γ	**photons**	411 photons (CMB) / m^3 > énergie totale faible
ν	**neutrinos**	trois saveurs > ν_e, ν_μ, ν_τ
b	**baryons + électrons**	Univers primordial > 75% H + 25% ^{4}He + traces de ^{2}H, ^{3}He et ^{7}Li
CDM	**matière noire froide**	Introduite pour expliquer la formation des structures de l'Univers > nature fondamentale inconnue
Λ	**"vide"**	énergie noire > nature fondamentale inconnue !

Pour l'équation de Friedmann :

$$\rho(t) = \rho_\gamma(t) + \rho_\nu(t) + \rho_b(t) + \rho_{CDM}(t) + \rho_\Lambda(t)$$

Le contenu de l'Univers

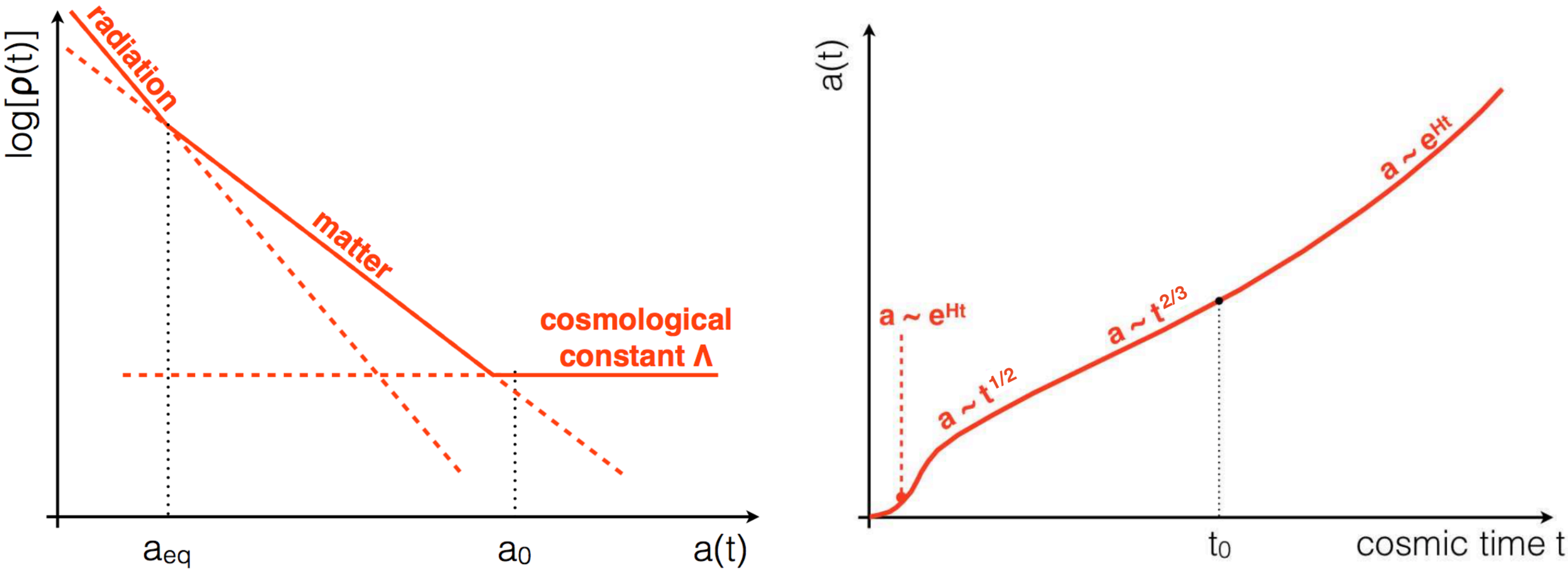
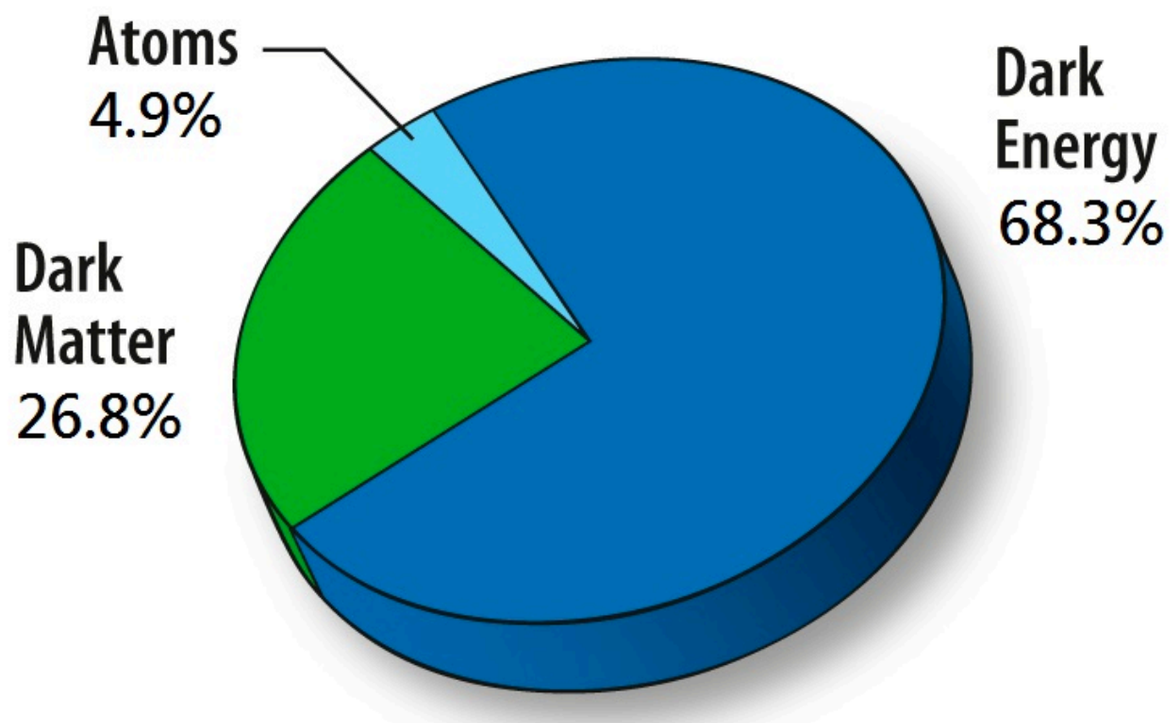
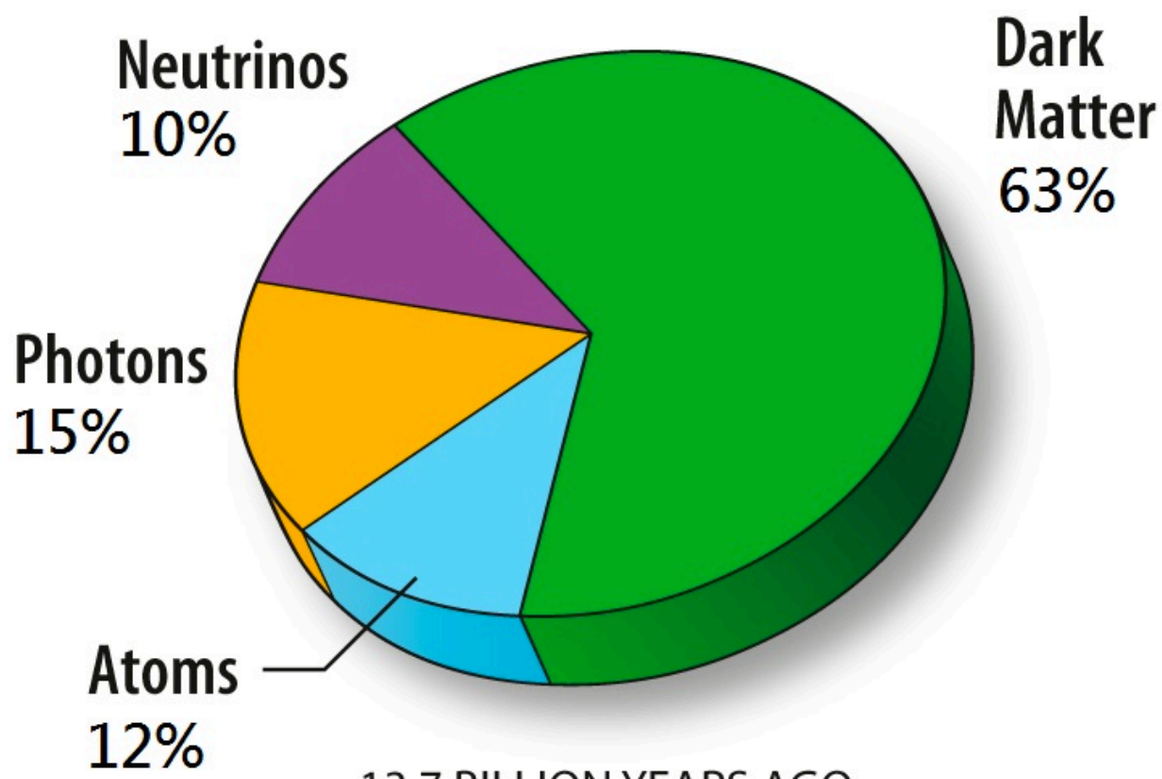


Figure 1.3: **Left panel:** energy density ρ as a function of the scale factor a. Different constituents of the universe dominates at different time of the history: radiation, non-relativistic matter and a potential cosmological constant. **Right panel:** behavior of the scale factor a as a function of the cosmic time t, in the frame of the ΛCDM model.



TODAY



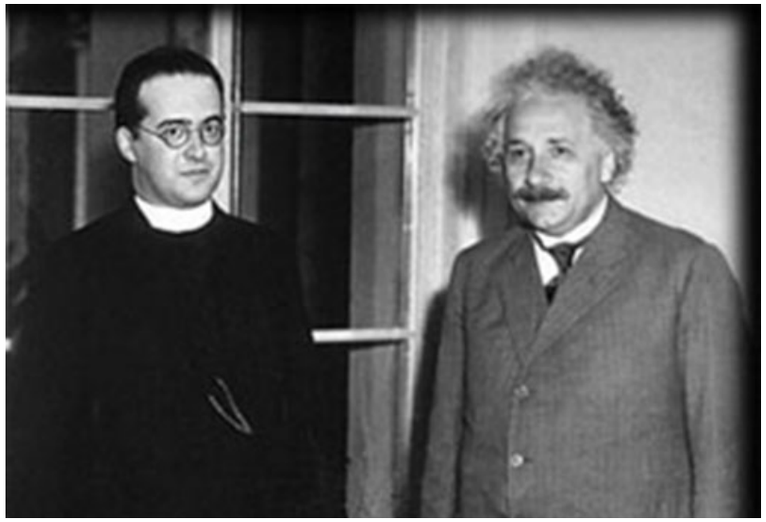
13.7 BILLION YEARS AGO

(Universe 380,000 years old)

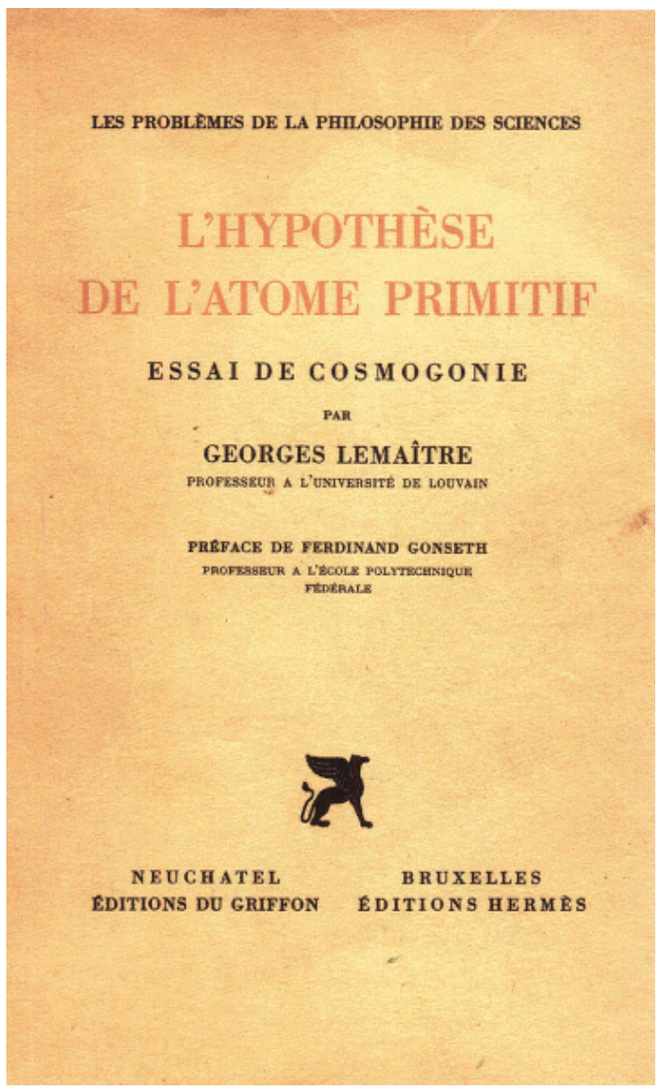
- pour un Univers isotrope, homogène et en expansion, les équations d'Einstein sont simples

- les distances et volumes cosmologiques sont de simples fonctions de z et des densités d'énergie aujourd'hui

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



Georges Lemaître
(1894-1966)



LES PROBLÈMES DE LA PHILOSOPHIE DES SCIENCES

L'HYPOTHÈSE
DE L'ATOME PRIMITIF

ESSAI DE COSMOGONIE

PAR

GEORGES LEMAÎTRE

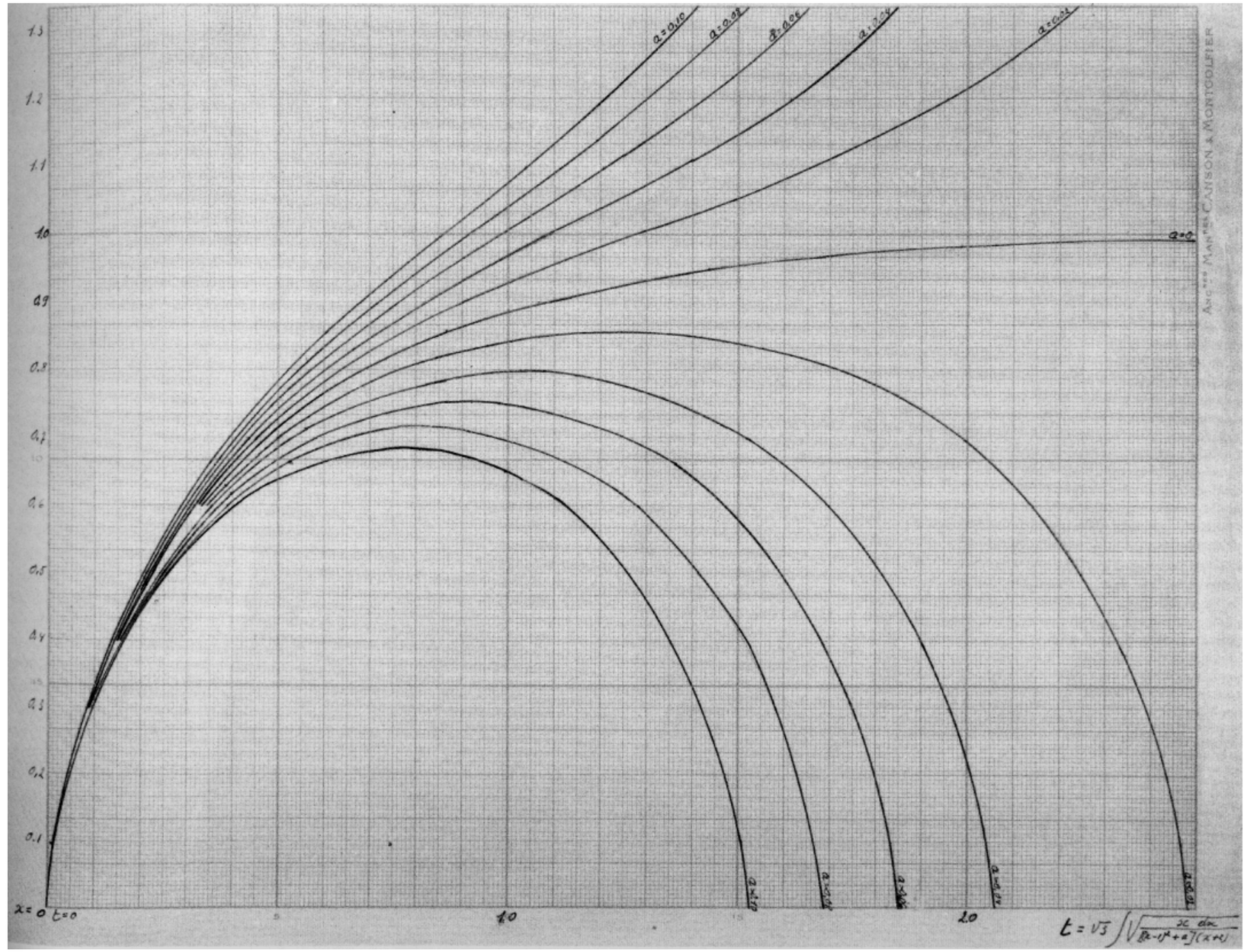
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN

PRÉFACE DE FERDINAND GONSETH

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE

NEUCHATEL
ÉDITIONS DU GRIFFON

BRUXELLES
ÉDITIONS HERMÈS



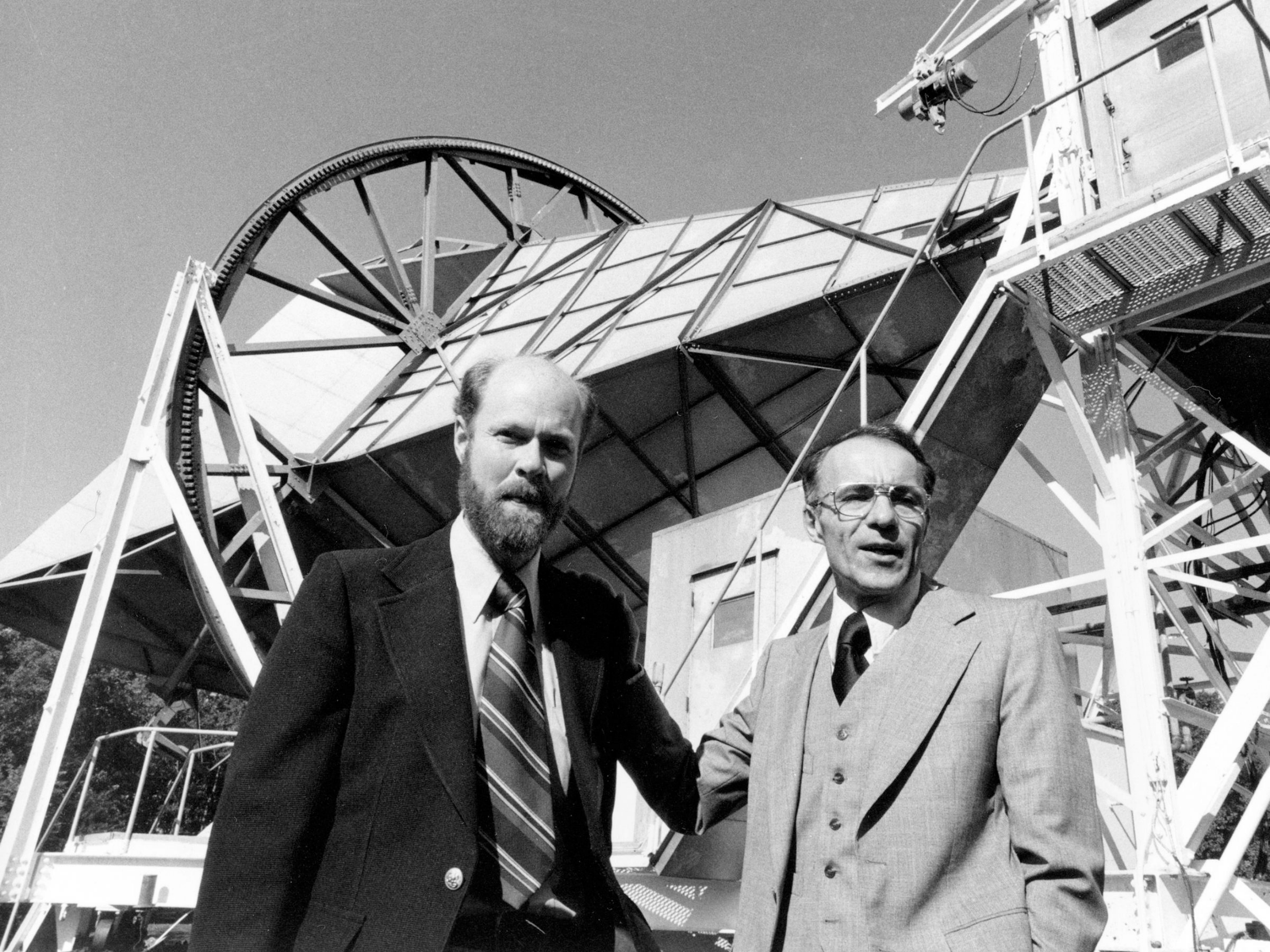
***The Birth of Space According to Lemaître**. Having discovered, independently of Friedmann, that general relativity could apply to a non-static universe, Georges Lemaître developed two models which he believed could explain the "birth of space". First he calculated how the universe would have evolved if it were homogeneous and isotropic. In the Lemaitre archive at Louvain is a diary containing a draft of his 1927 article as well as two unpublished diagrams showing the time evolution of the "cosmic scale factor" (a measure of the size of the universe as a function of time) depending on the value of the cosmological constant for all possible universes with positive curvature. In 1931 he proposed a second model, based on the primeval atom, in which space and time were born simultaneously. It is a variation of this model on which modern big bang theory is based. The last data on the Cosmic Microwave Background (Spring 2000) seem to favor such a Lemaître model with a positive cosmological constant (i.e., an ever-expanding space, at an accelerating rate).*

Georges Lemaître, manuscripts, 1927, Louvain, University, Lemaître archive;

Découverte du Fond Diffus Cosmologique

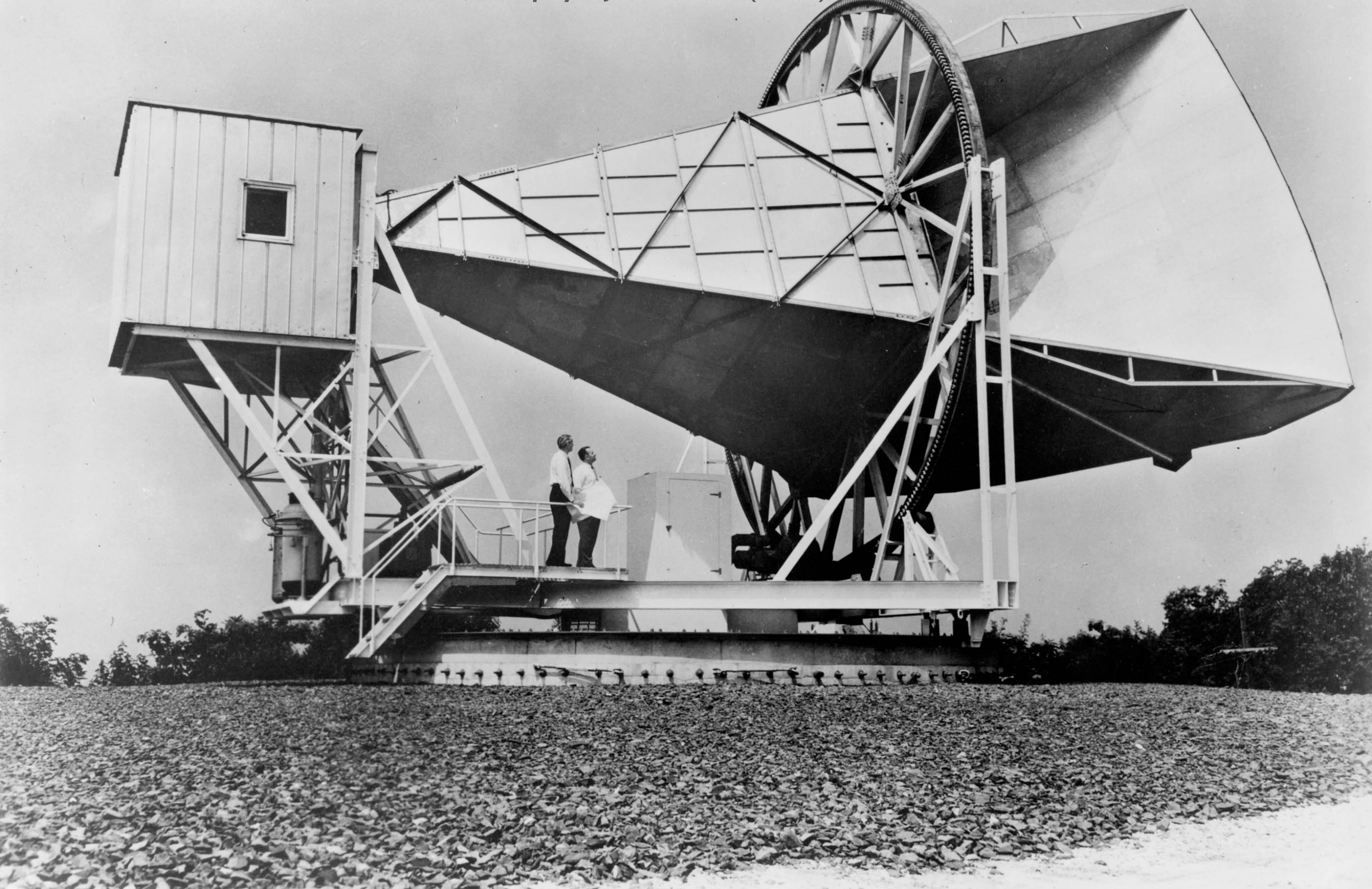
time	energy
10^{-43} sec	10^{19} GeV
10^{-35} sec	10^{15} GeV
10^{-11} sec	10^{3} GeV
10^{-6} sec	1 GeV
1 sec	1 MeV
380,000 yrs	1 eV
14 billion yrs	1 meV (3K)

Planck epoch
Quantum Gravity?

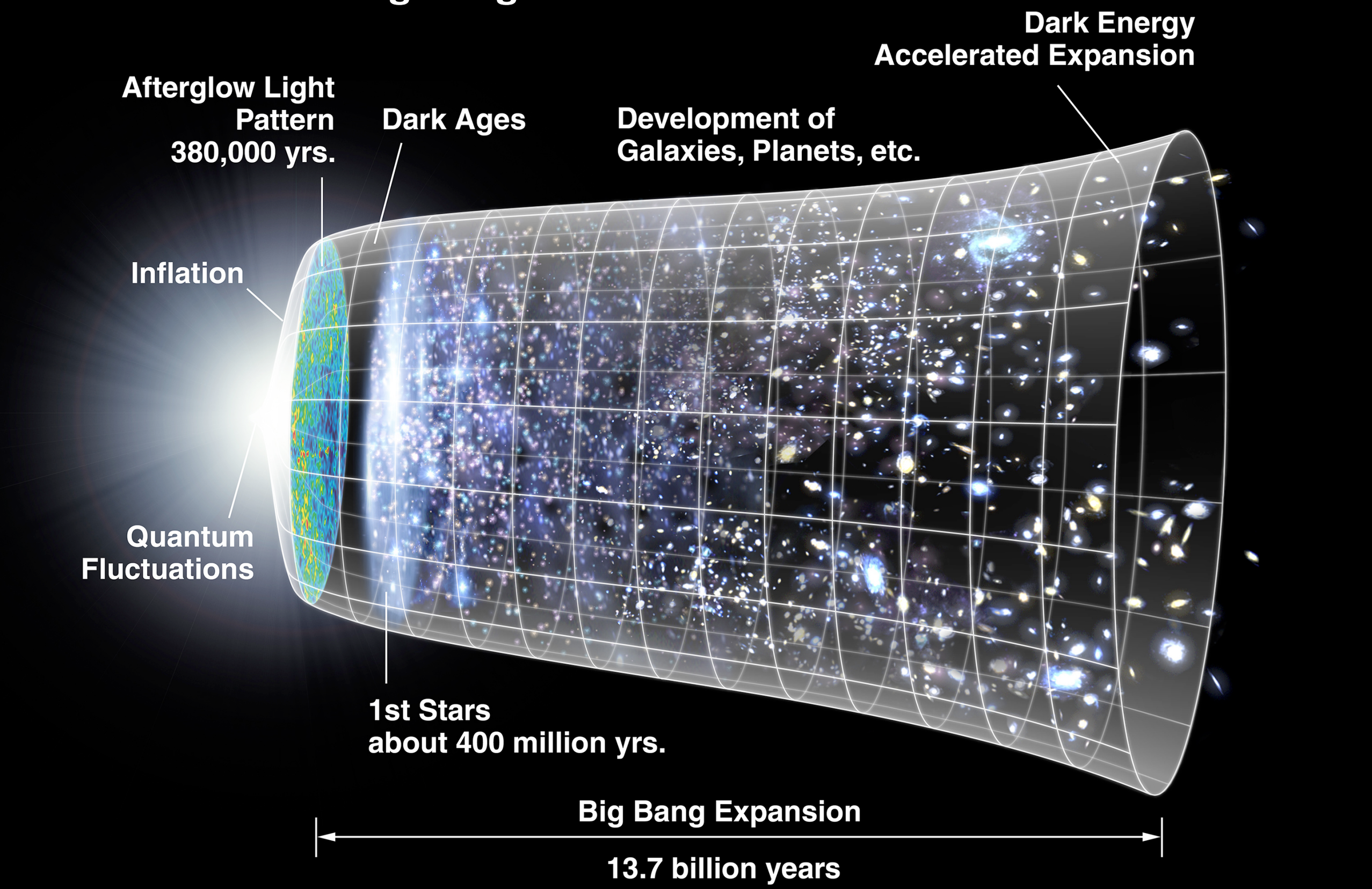


Arno Penzias and Robert Woodrow Wilson measure the temperature to be approximately 3 K.

A. A. Penzias and R. W. Wilson, Astrophys. J. 142, 419 (1965)

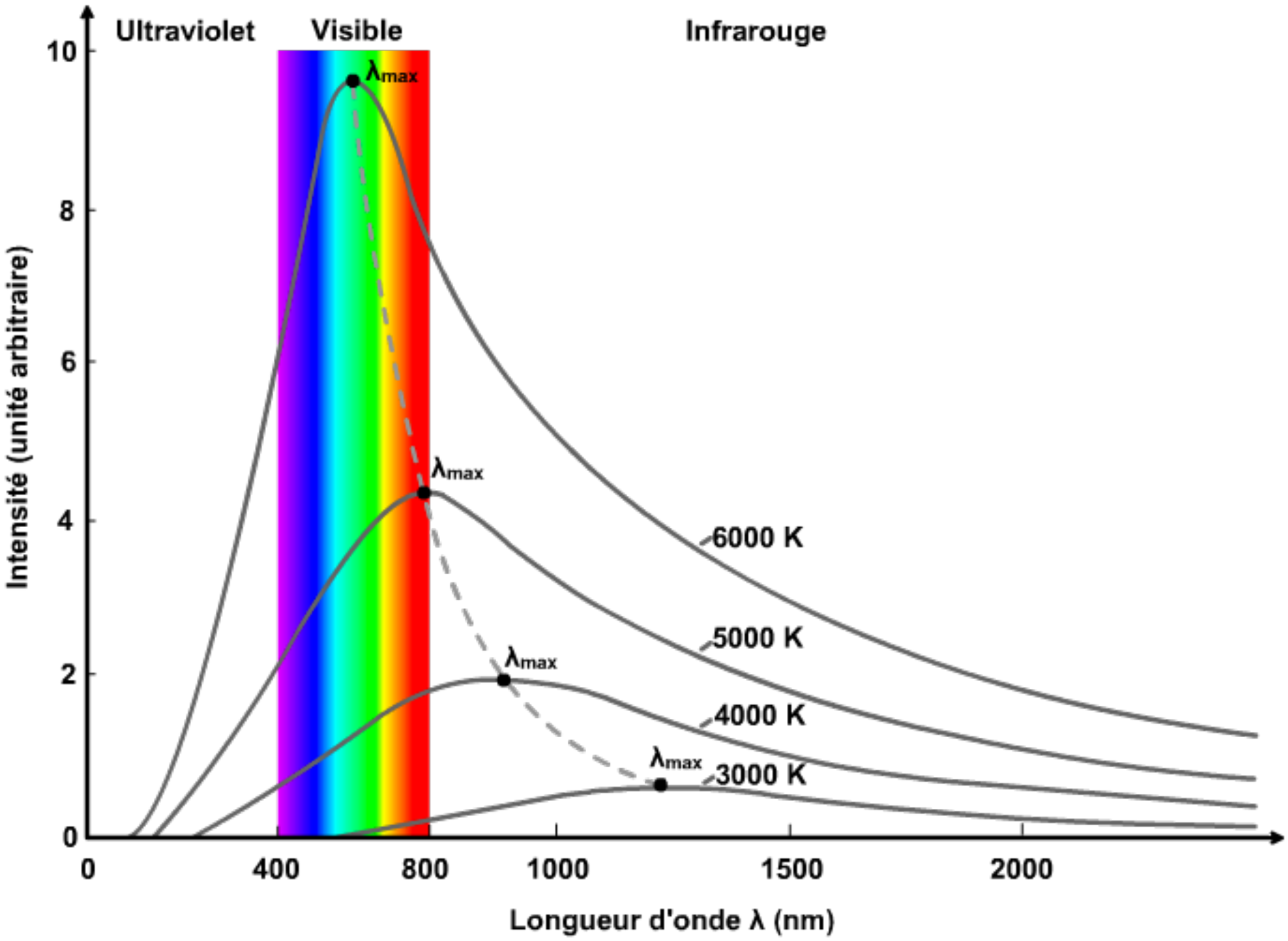


Reminder of the Big Bang scenario

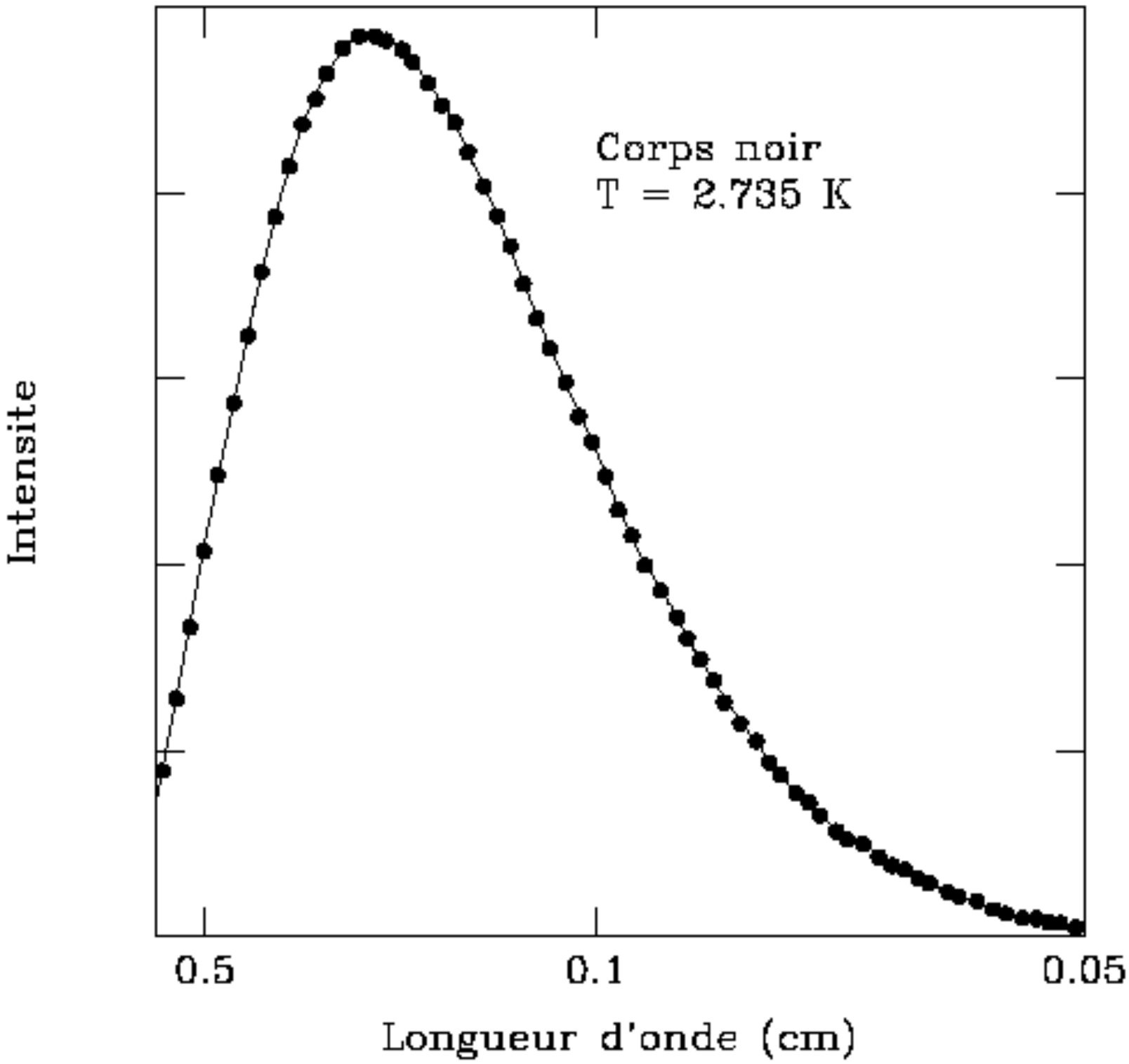


credits: WMAP

Prédiction de la théorie du Big Bang chaud : le rayonnement fossile suit une loi de corps noir avec une température de 3K



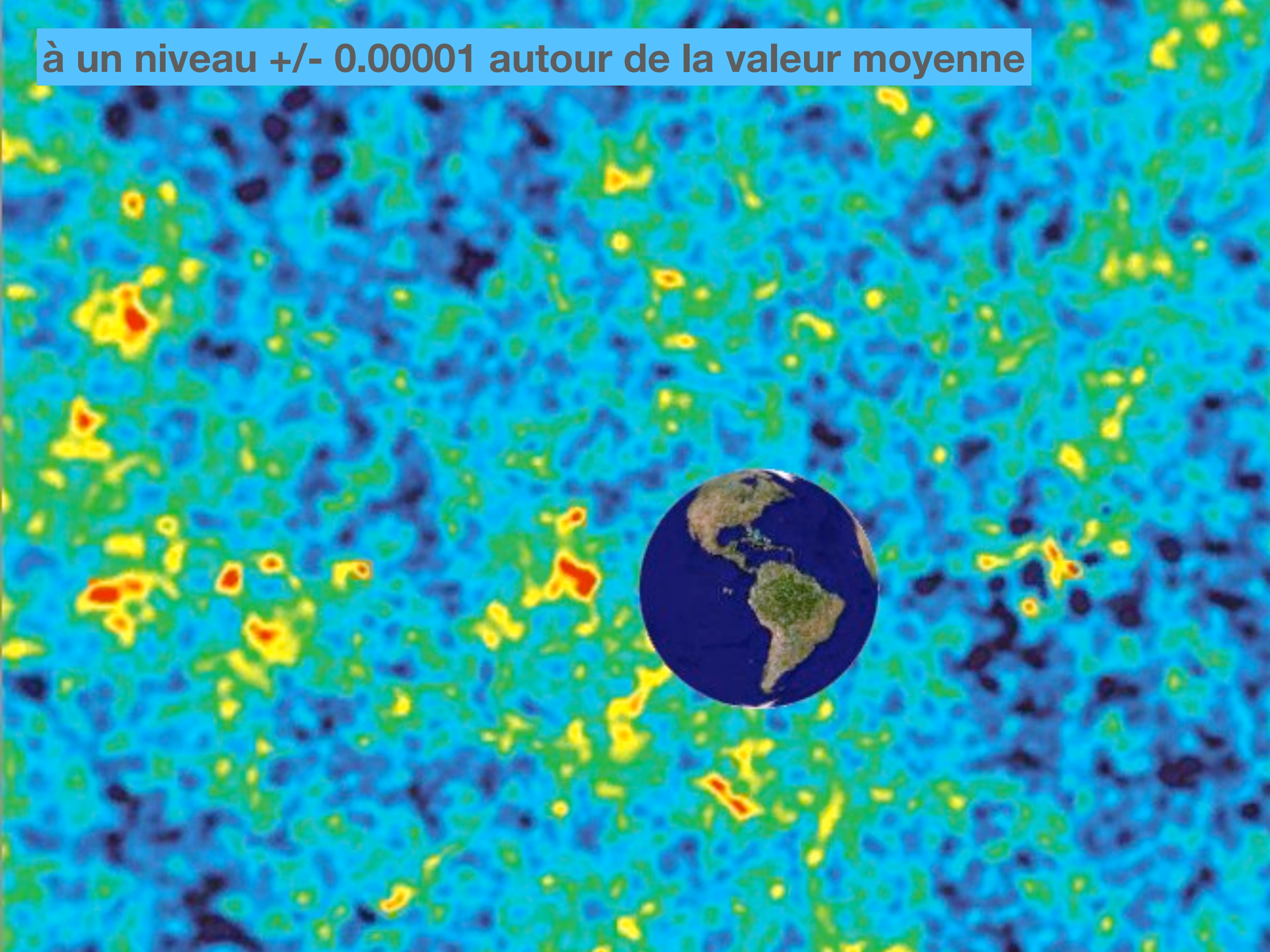
Prédiction de la théorie du Big Bang chaud : le rayonnement fossile suit une loi de corps noir avec une température de 3K



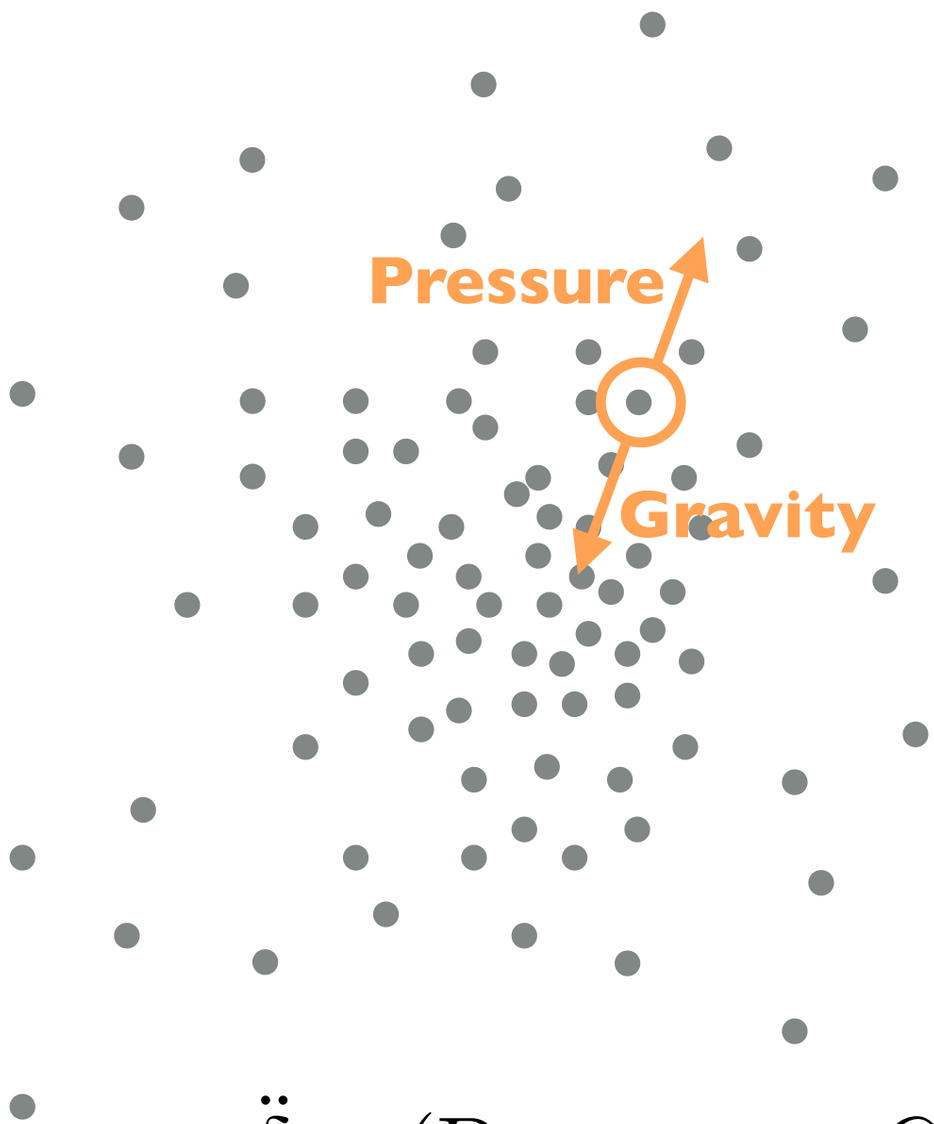
prix Nobel 2006

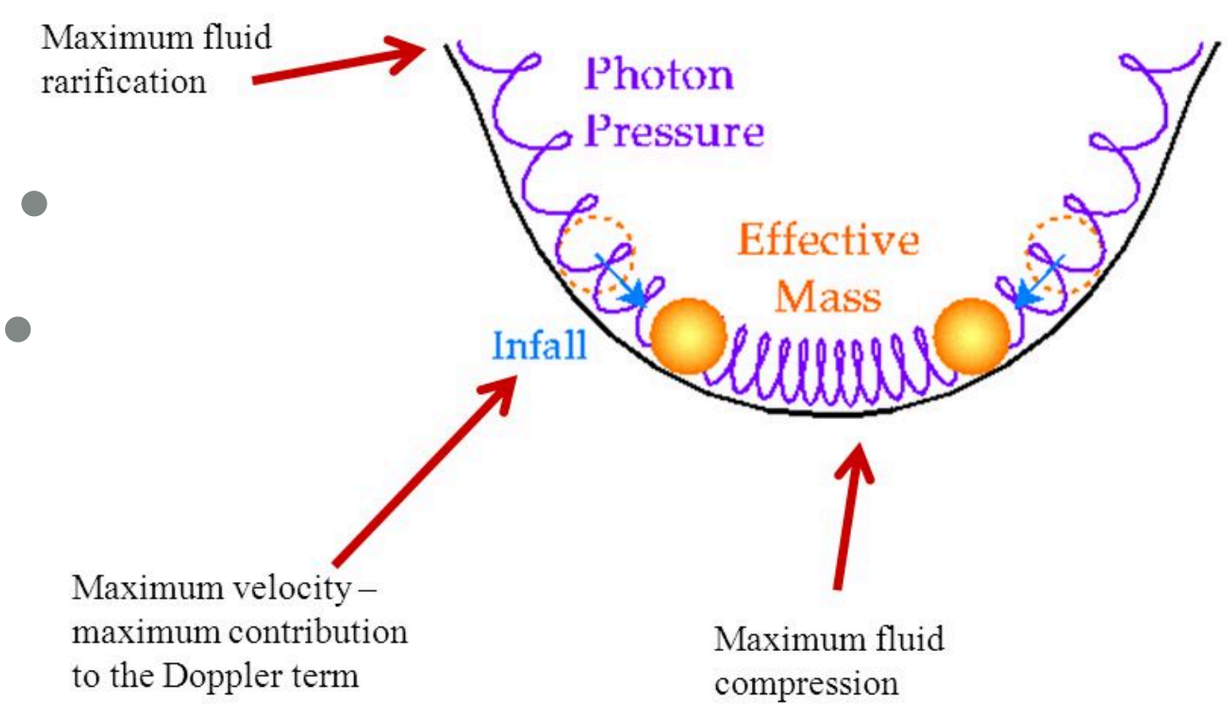
fond diffus cosmologique = rayonnement diffus, homogène, correspondant à un corps porté à une température de 2.725K

à un niveau +/- 0.00001 autour de la valeur moyenne



Physics of CMB anisotropies





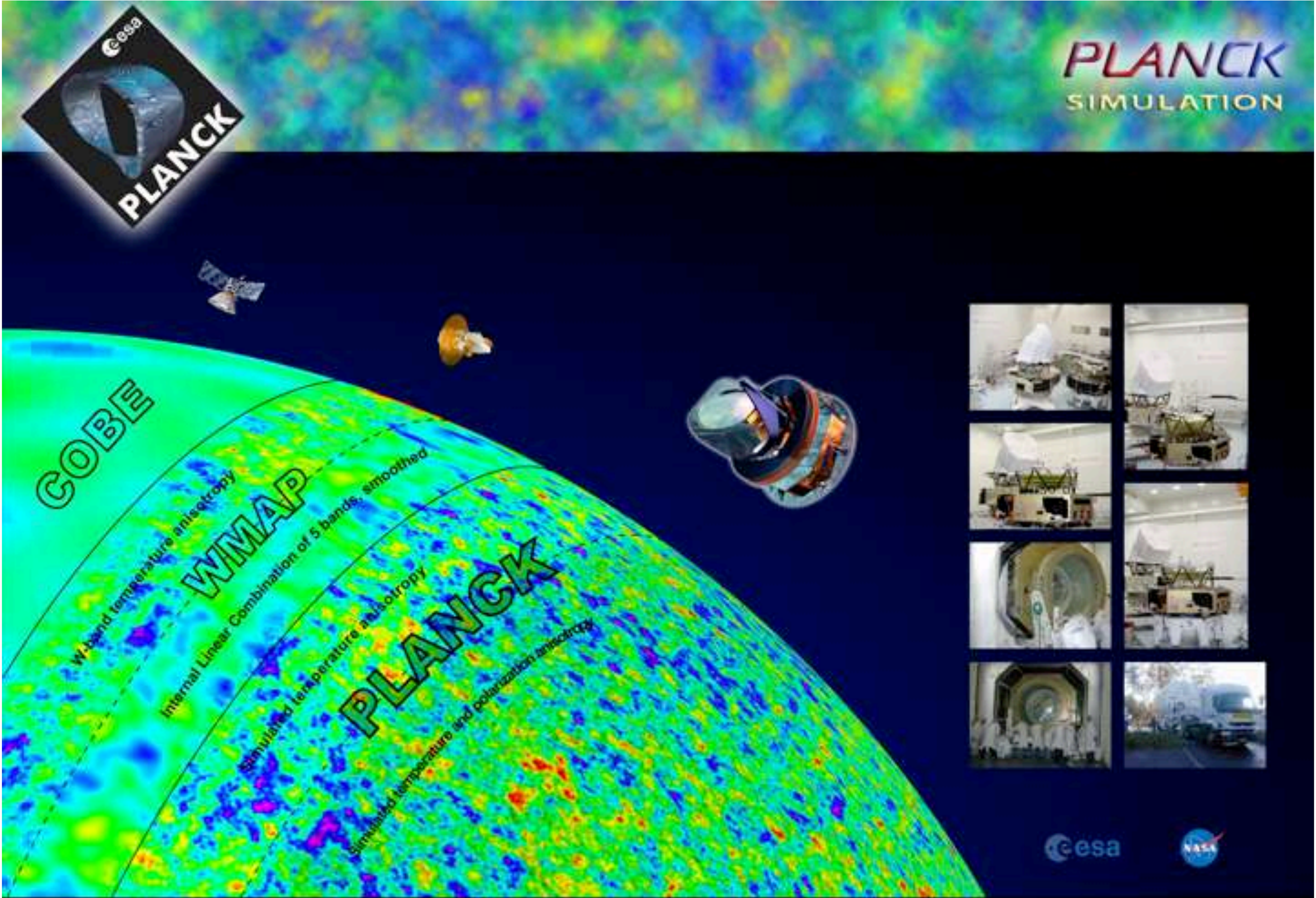
Gravitational instability. Mass near an overdense region is attracted to the center by gravity but repelled by pressure. If the region is dense enough, gravity wins and the over density grows with time.

$$\ddot{\delta} + (\text{Pressure} - \text{Gravity})\,\delta = 0$$

high pressure ⟶ inhomogeneities do not grow
low pressure ⟶ inhomogeneities grow exponentially
comparable to gravity ⟶ inhomogeneities oscillates with time

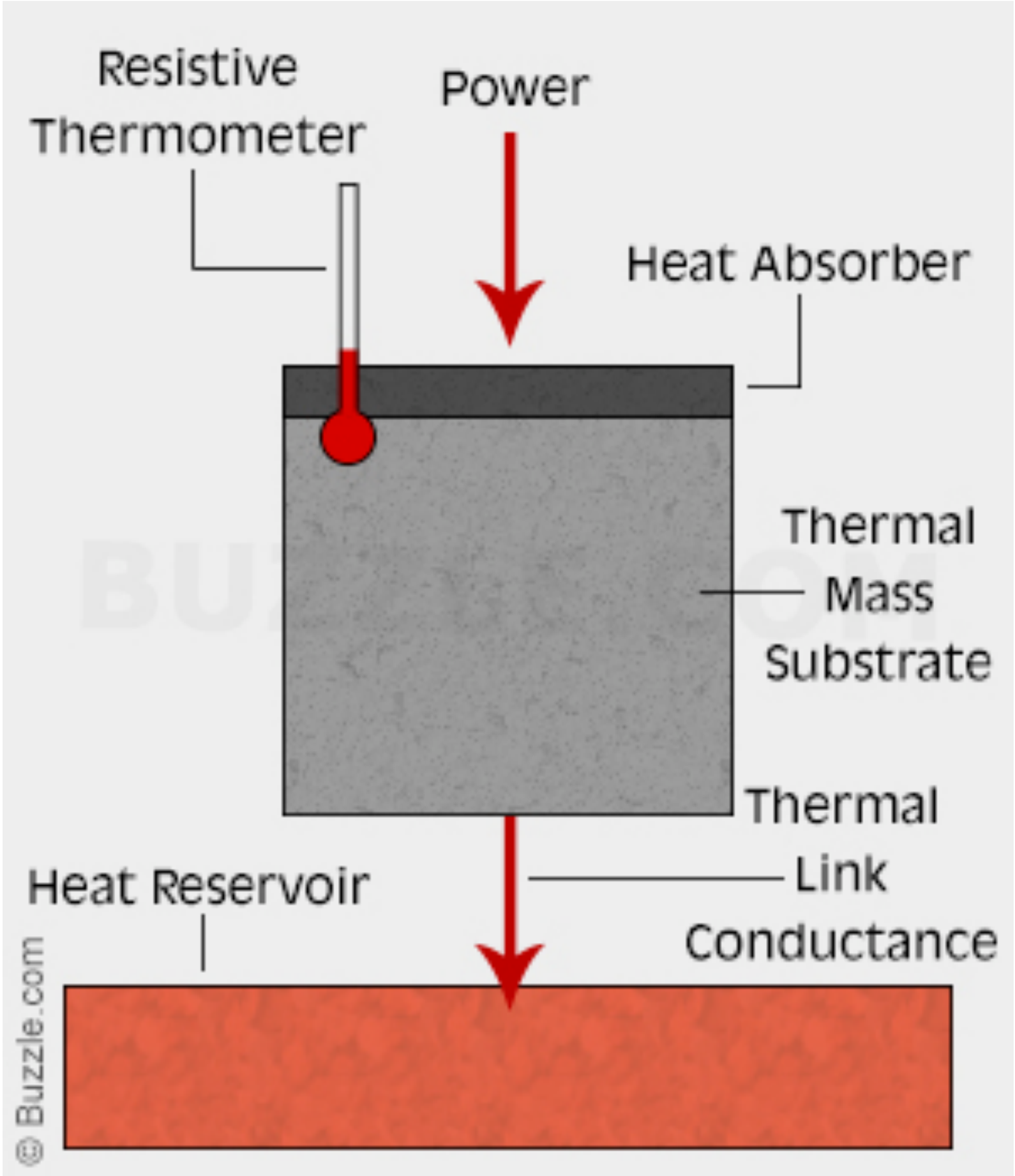
$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - \frac{c_s^2}{a^2}\nabla^2\delta = 4\pi G\bar{\rho}\delta$$

PLANCK SIMULATION

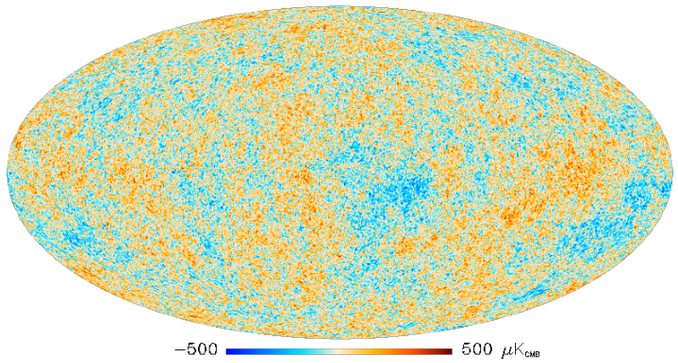


Planck

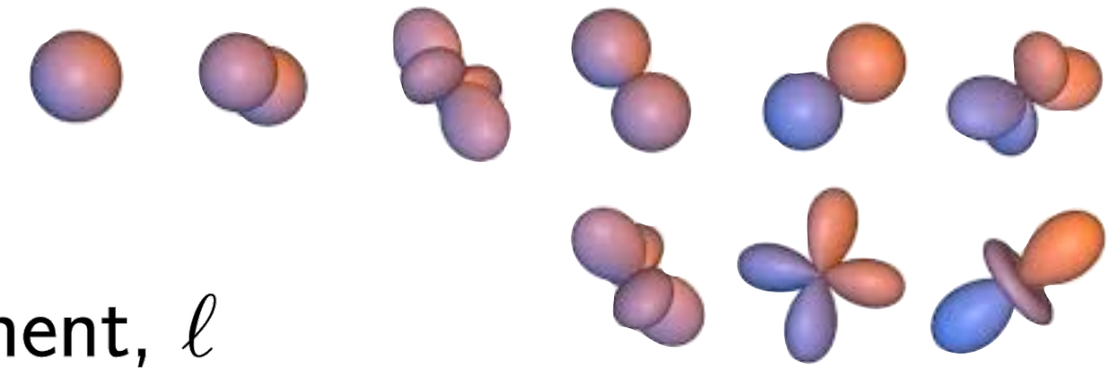
fonctionnement d'un des bolomètres (= détecteurs à bord du satellite)

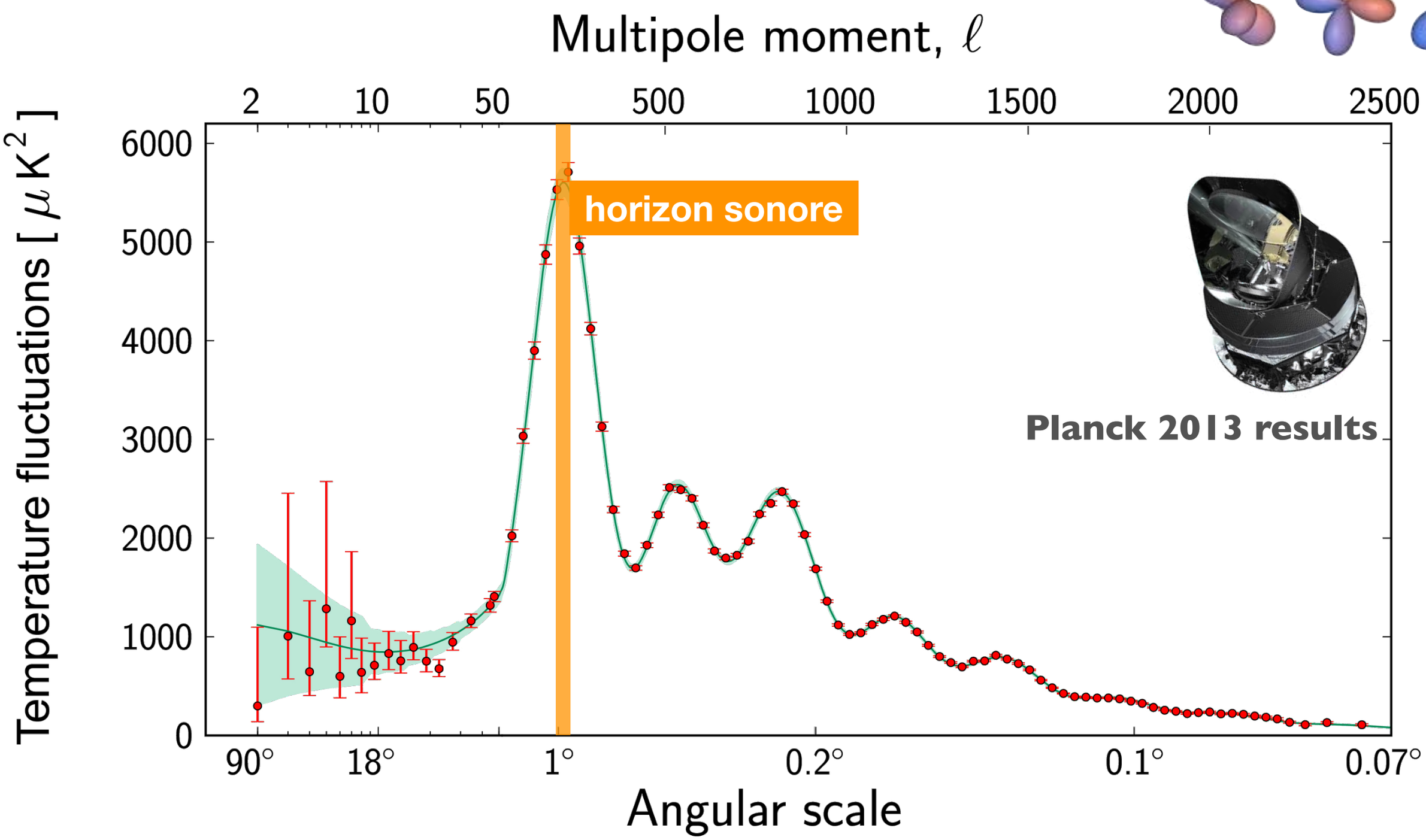


L'analyse des cartes du fond diffus cosmologique

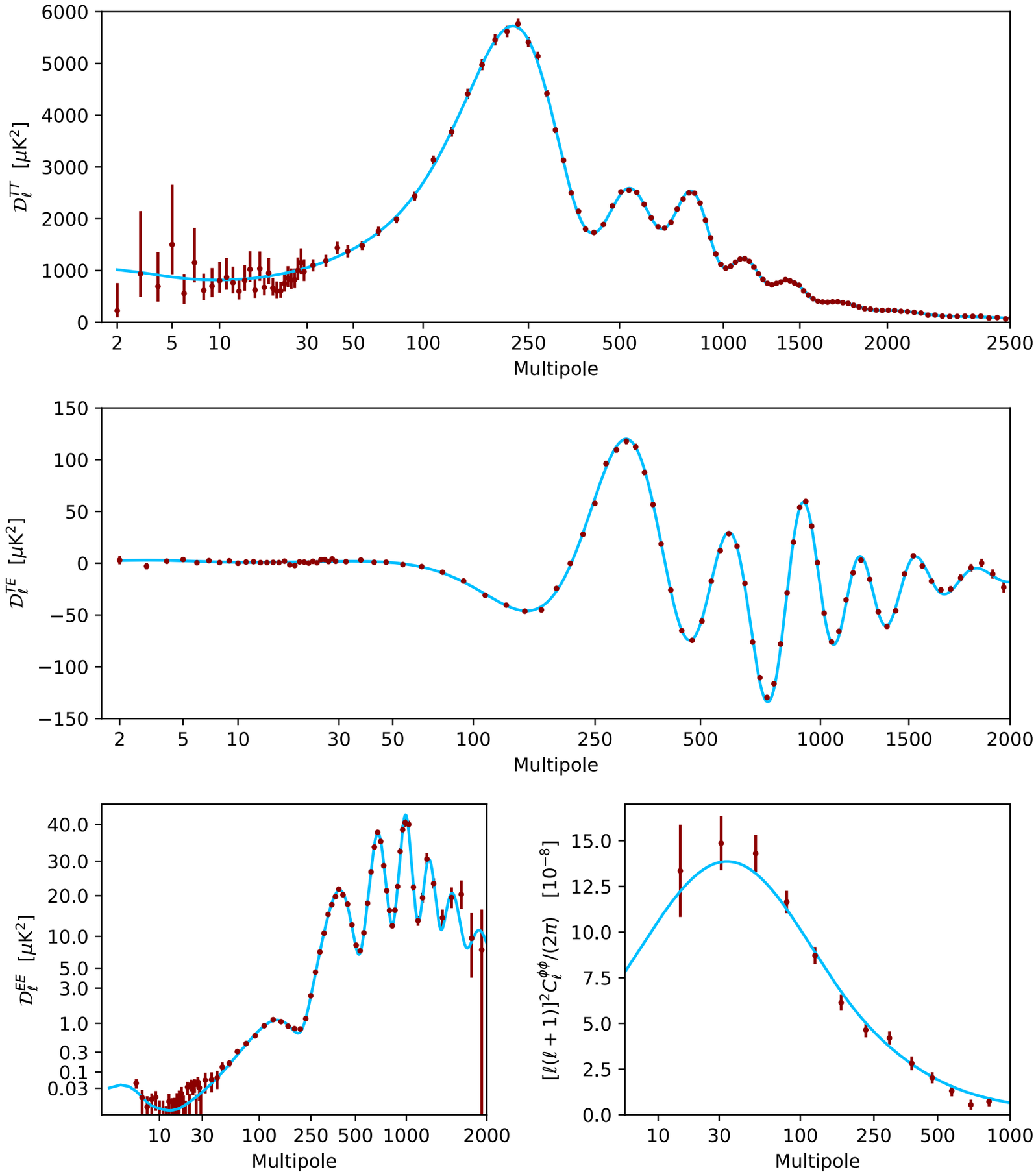


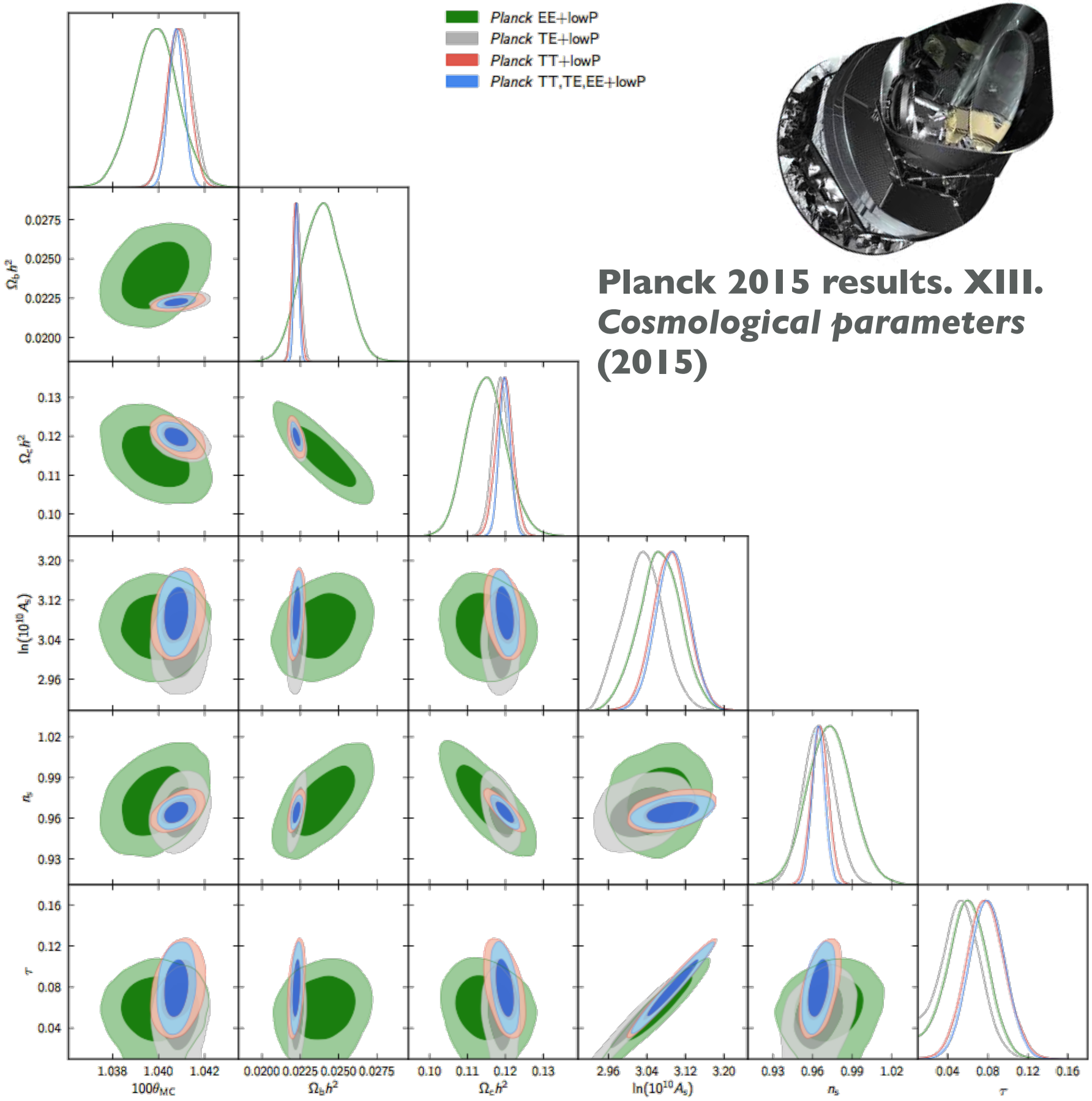
$$= \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^{T} Y_{\ell}^{m}(\theta, \phi)$$





last Planck data release, from last week !



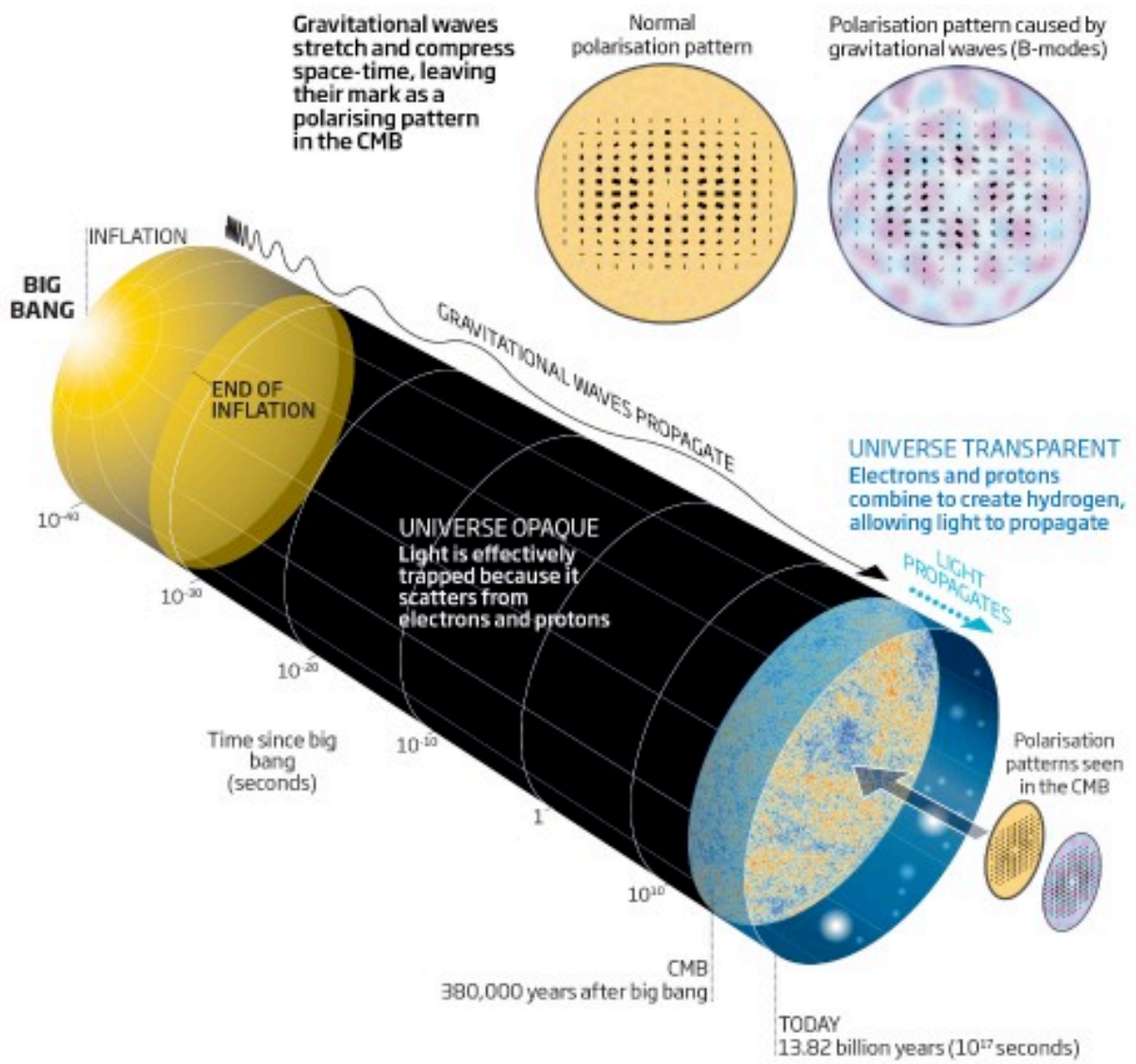


Planck 2015 results. XIII. *Cosmological parameters* (2015)

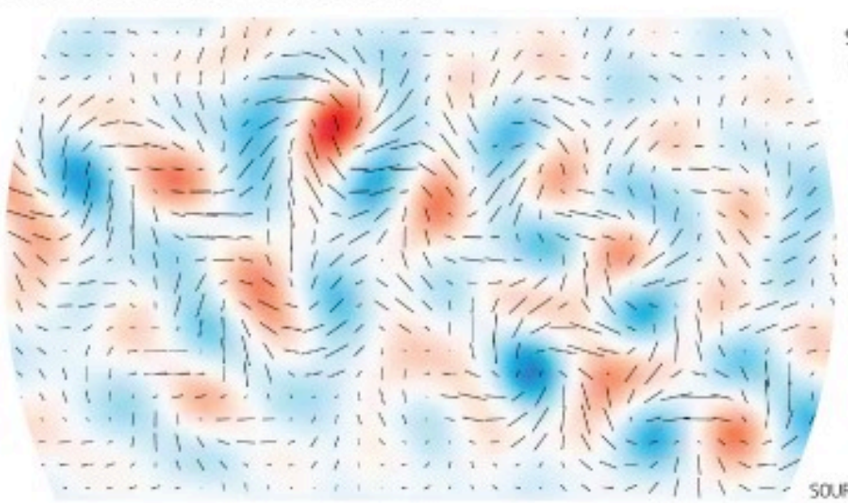
Fig. 6. Comparison of the base ΛCDM model parameter constraints from *Planck* temperature and polarization data.

The fingerprint of inflation...

The cosmic microwave background radiation (CMB) was predicted to carry a distinct polarisation pattern created by primordial gravitational waves that tells us about the state of the universe mere moments after cosmic birth



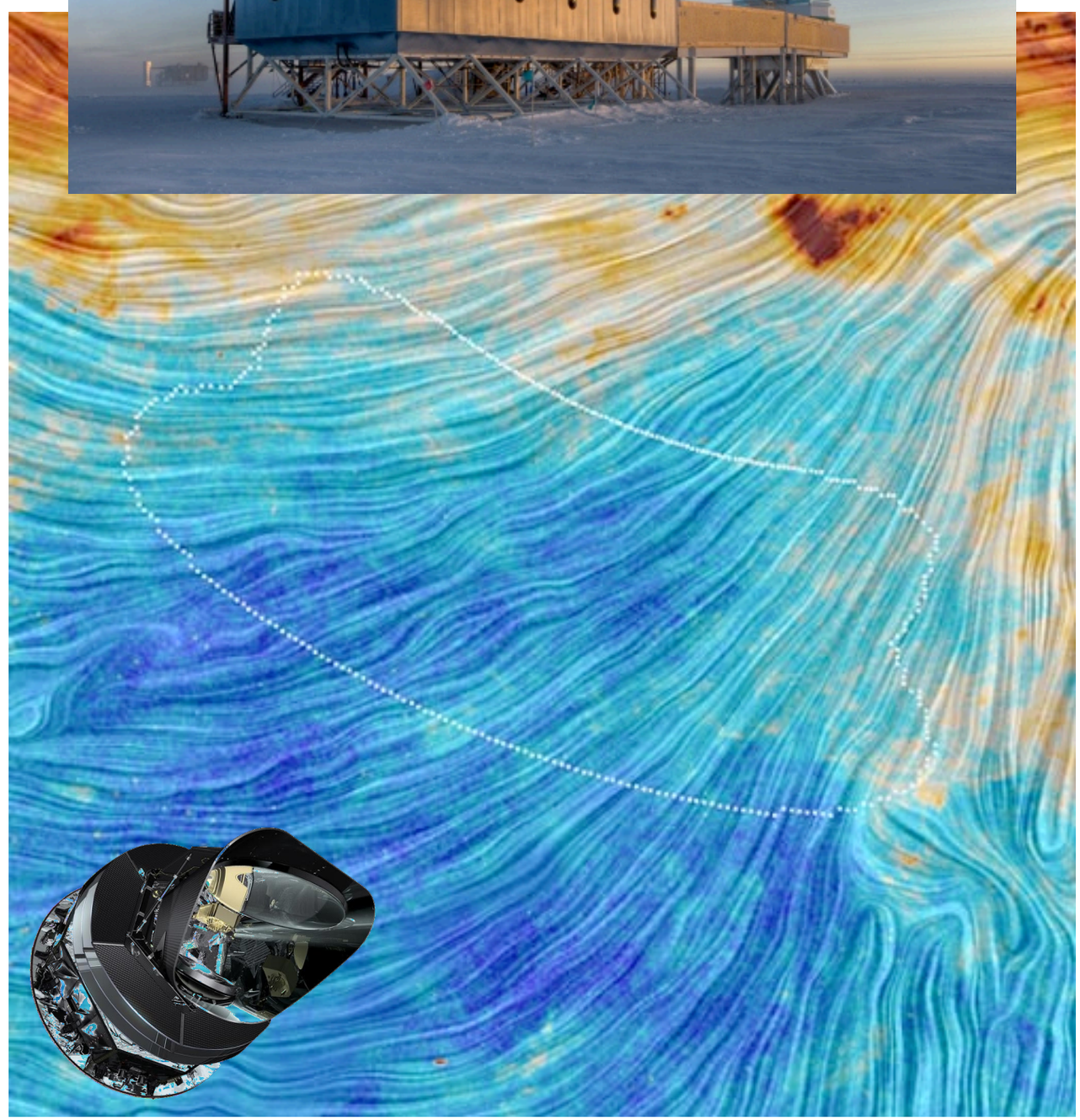
...and the whorls of space-time



Swirls in the polarisation of the CMB, seen here in data from the BICEP2 experiment, show the first clear signal of primordial gravitational waves, which is consistent with predictions

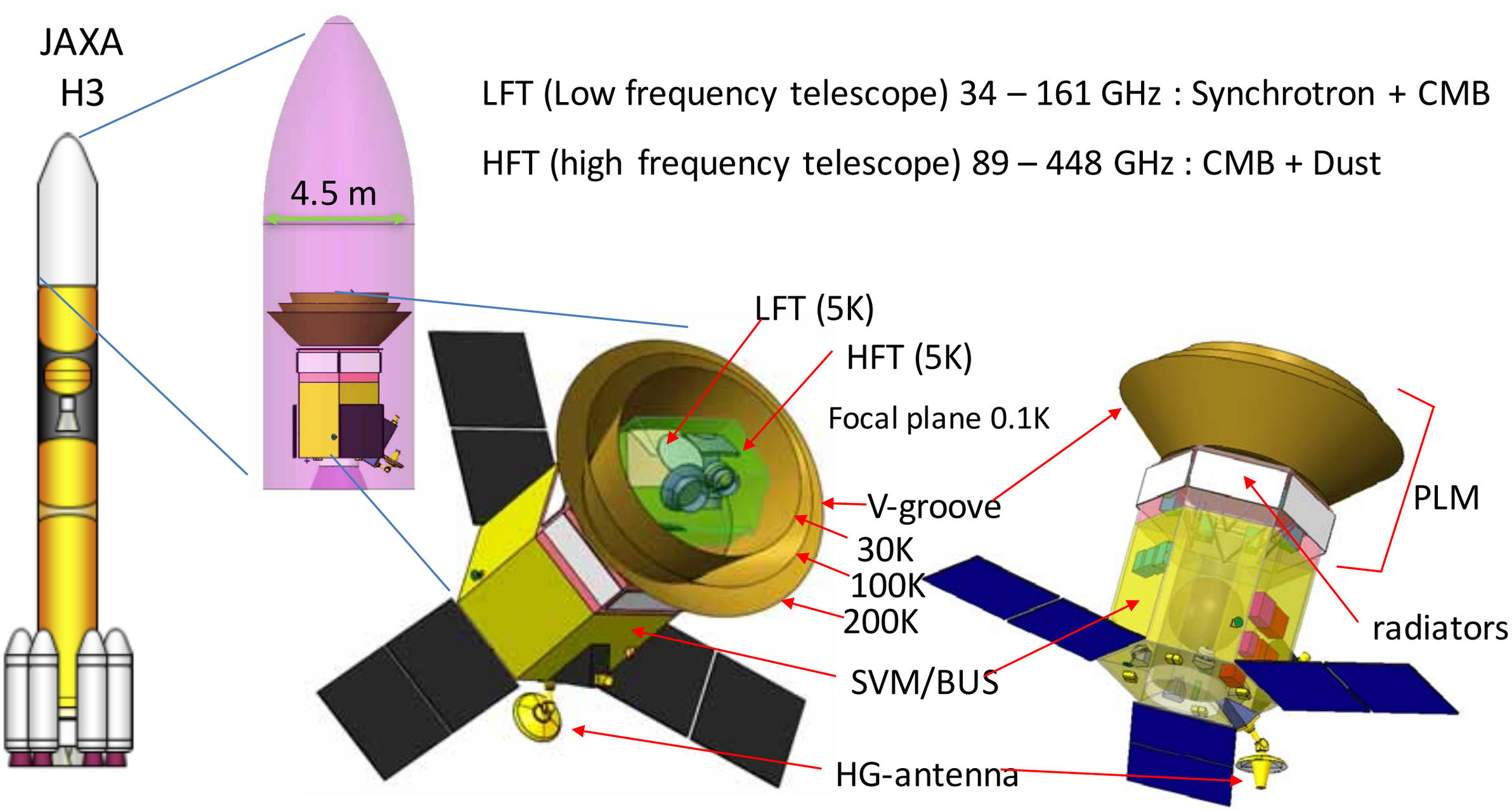
Red and blue shading highlight the intensity of the clockwise and anticlockwise B-mode twisting in the observed pattern

SOURCE: BICEP2



the Simons Observatory (first light: 2021)

a future project: the LiteBIRD satellite (launch: 2027)



LFT (Low frequency telescope) 34 – 161 GHz : Synchrotron + CMB

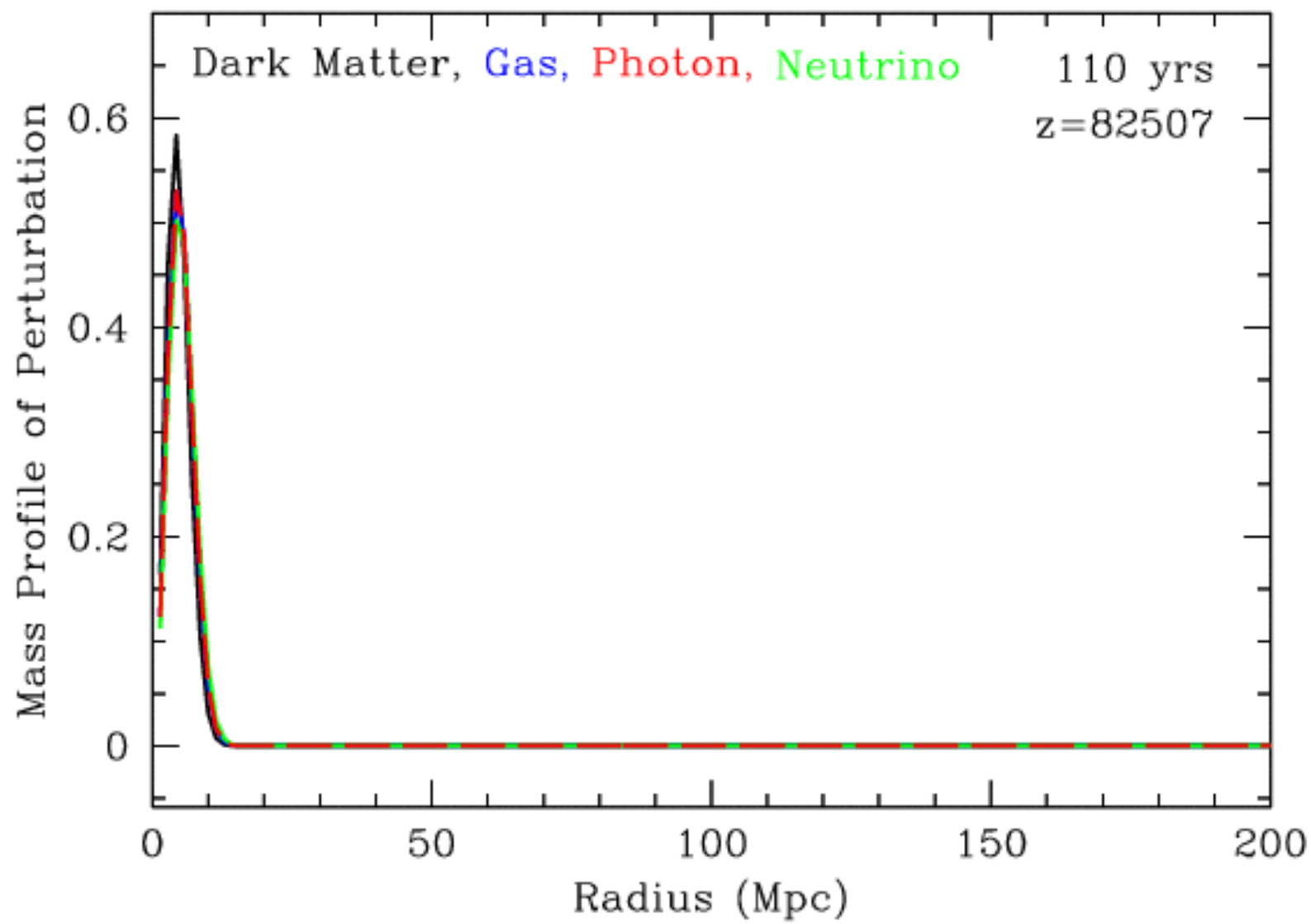
HFT (high frequency telescope) 89 – 448 GHz : CMB + Dust

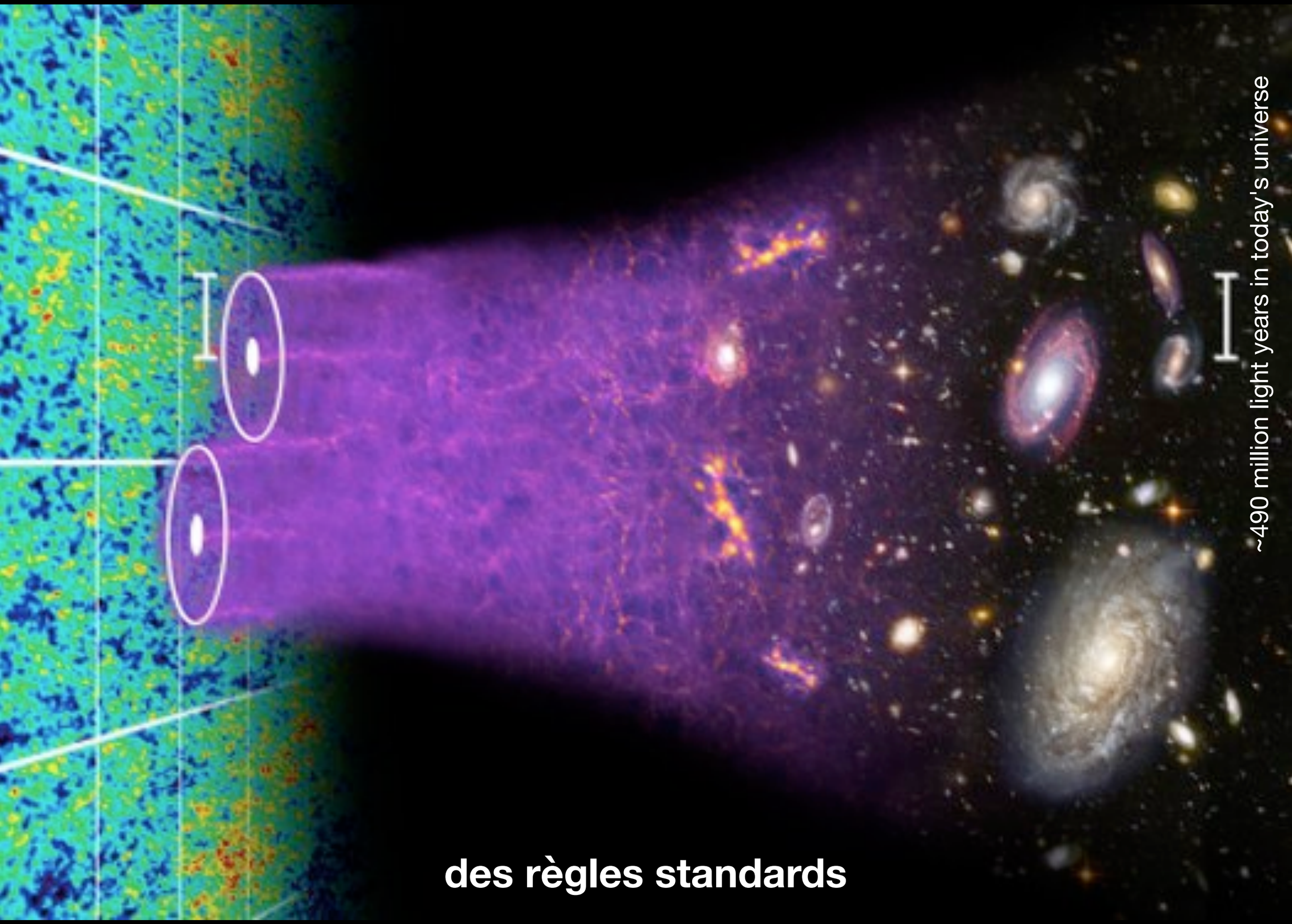
Autres sondes observationnelles :

- **Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)**
- **Lyman-alpha forest**
- **Optical weak lensing**
- **21 cm**
- **...**

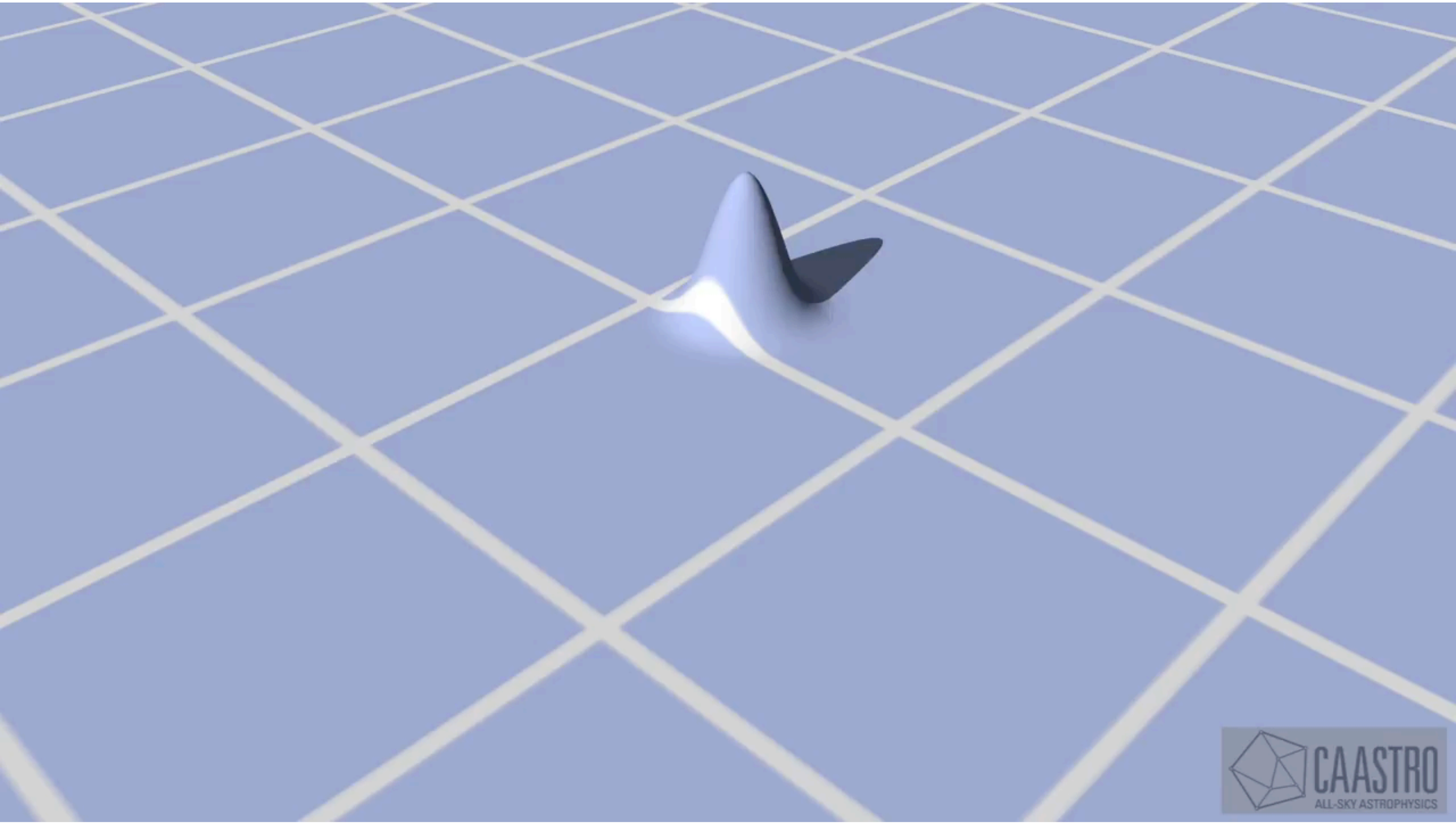
Oscillations baryoniques acoustiques

The evolution of a point-like initial density perturbation from Eisenstein, Seo, and White (2007). The graph shows the motion of the four cosmic components in spherical comoving coordinates. The baryon-photon acoustic wave travels outward to reach a radius of 150 Mpc (500 million light-years) and then stalls, creating an excess in the clustering of galaxies that we can still detect today.





des règles standards

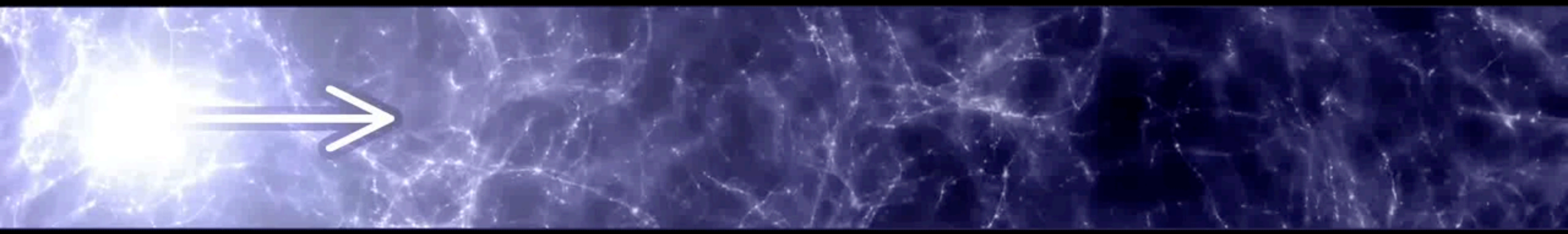

CAASTRO
ALL-SKY ASTROPHYSICS

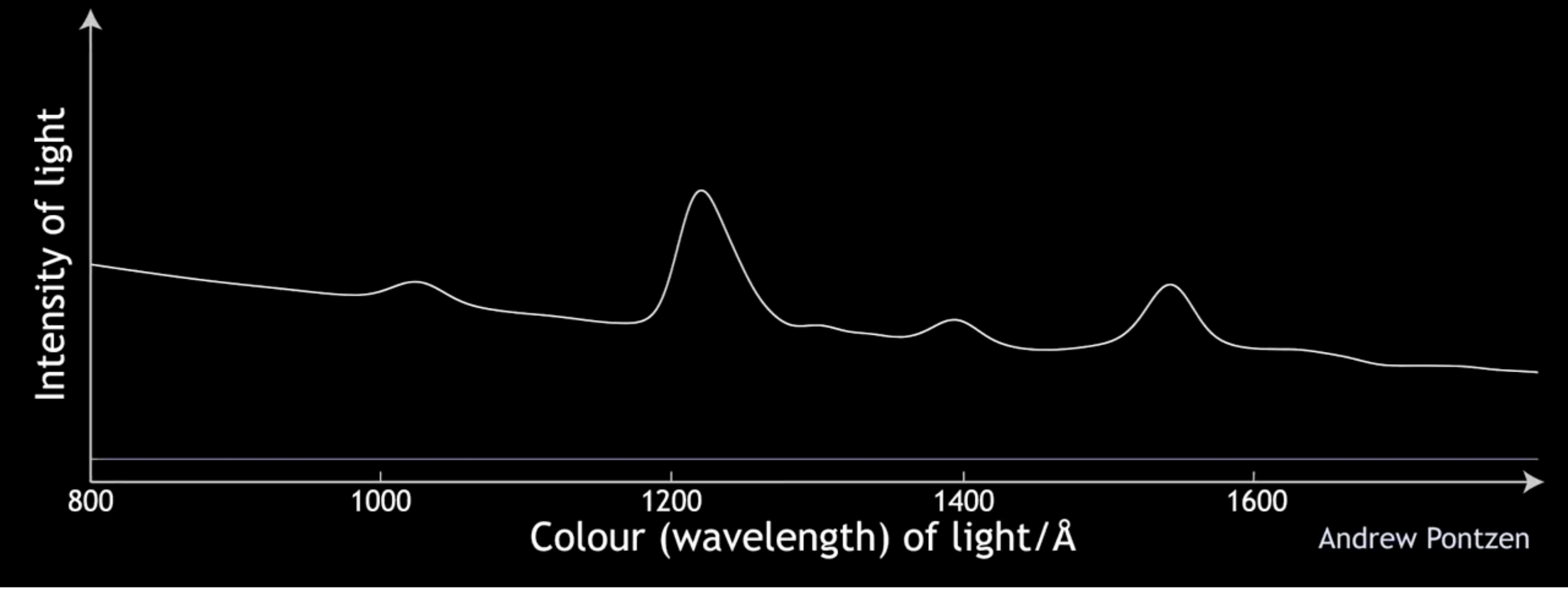
Autres sondes observationnelles :

- **Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)**
- **Lyman-alpha forest**
- **Optical weak lensing**
- **21 cm**
- **...**

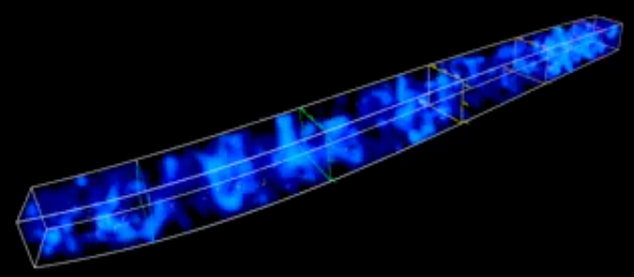
Quasar et forêt Lyman-alpha

Un **quasar** (source de rayonnement quasi-stellaire, quasi-stellar radiosource en anglais, ou plus récemment « source de rayonnement astronomique quasi-stellaire », quasi-stellar astronomical radiosource), est une galaxie très énergétique avec un noyau galactique actif.



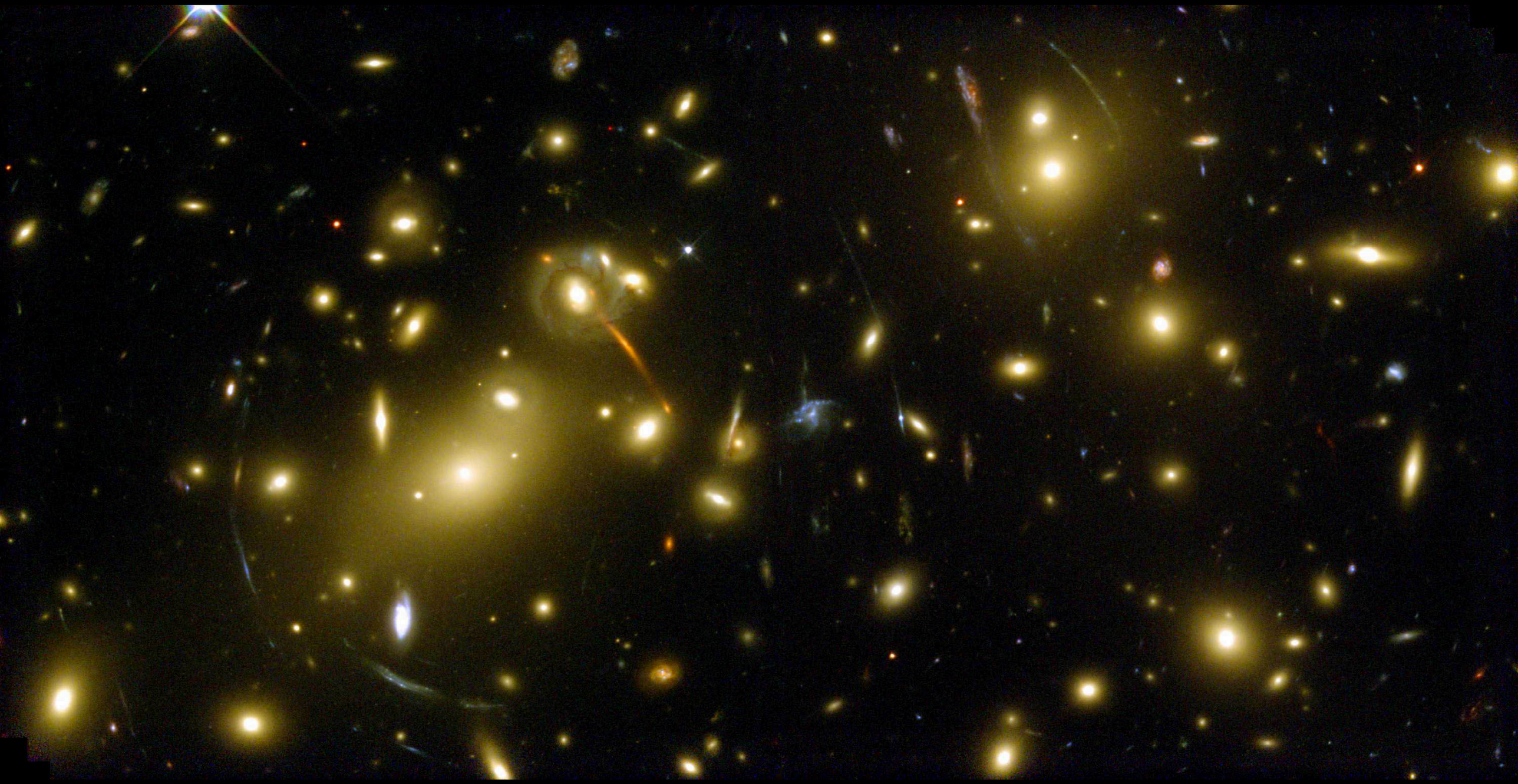


reconstruction tridimensionnelle des nuages de gaz H par observation de la forêt Lyman-alpha



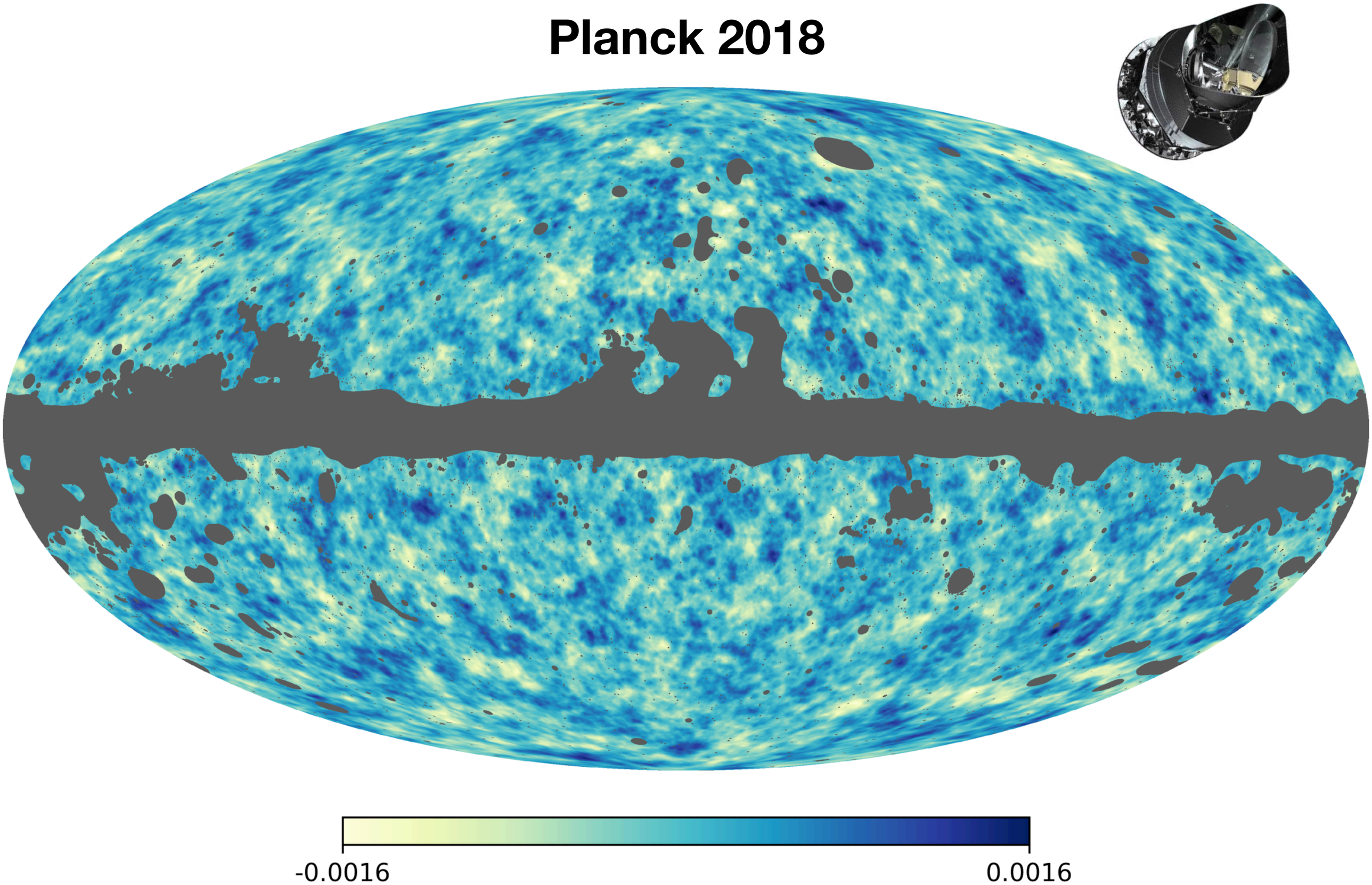
Autres sondes observationnelles :

- **Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)**
- **Lyman-alpha forest**
- **Optical weak lensing**
- **21 cm**
- **...**

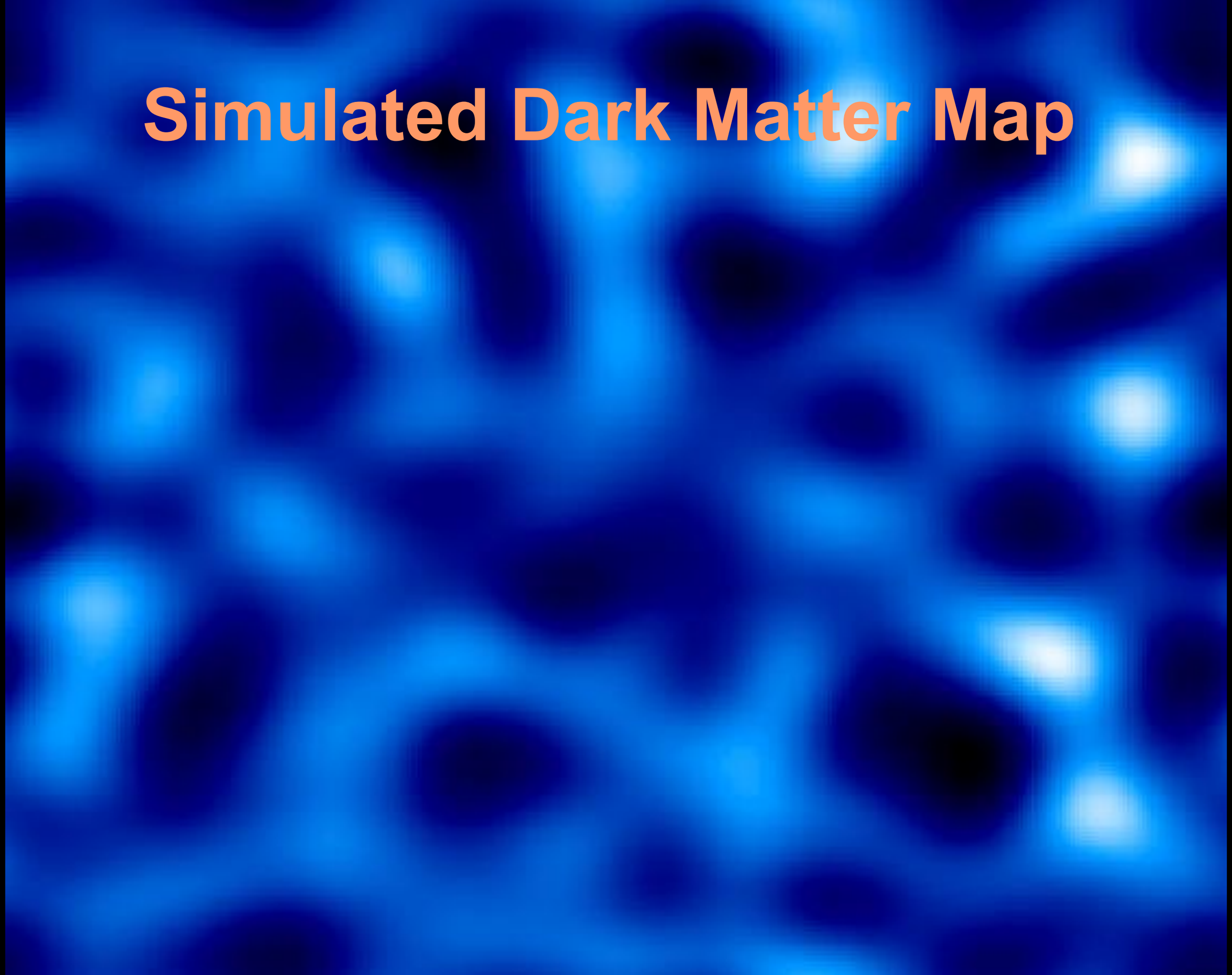


Galaxies randomly distributed
Slight alignment

Planck 2018

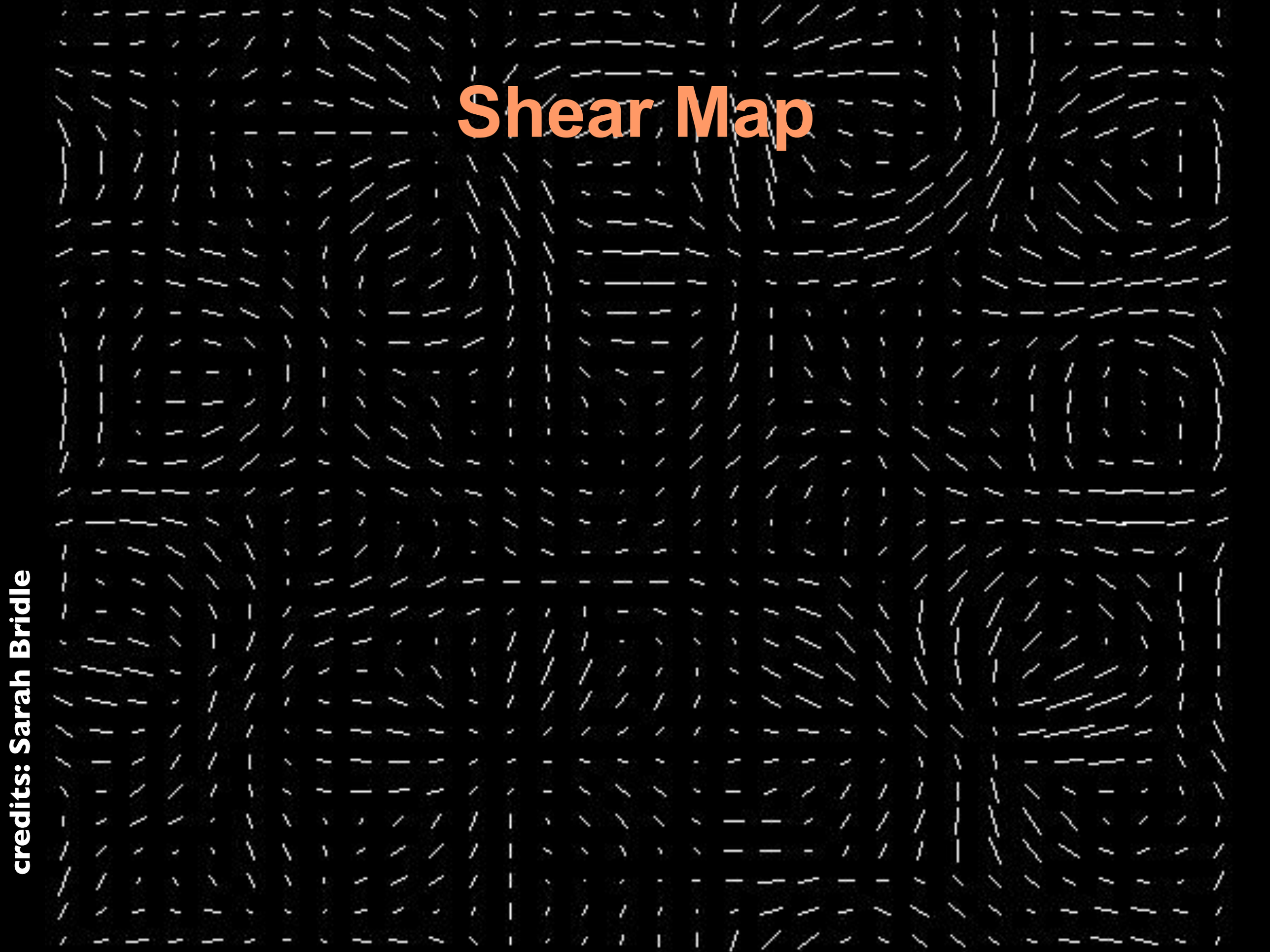


Simulated Dark Matter Map

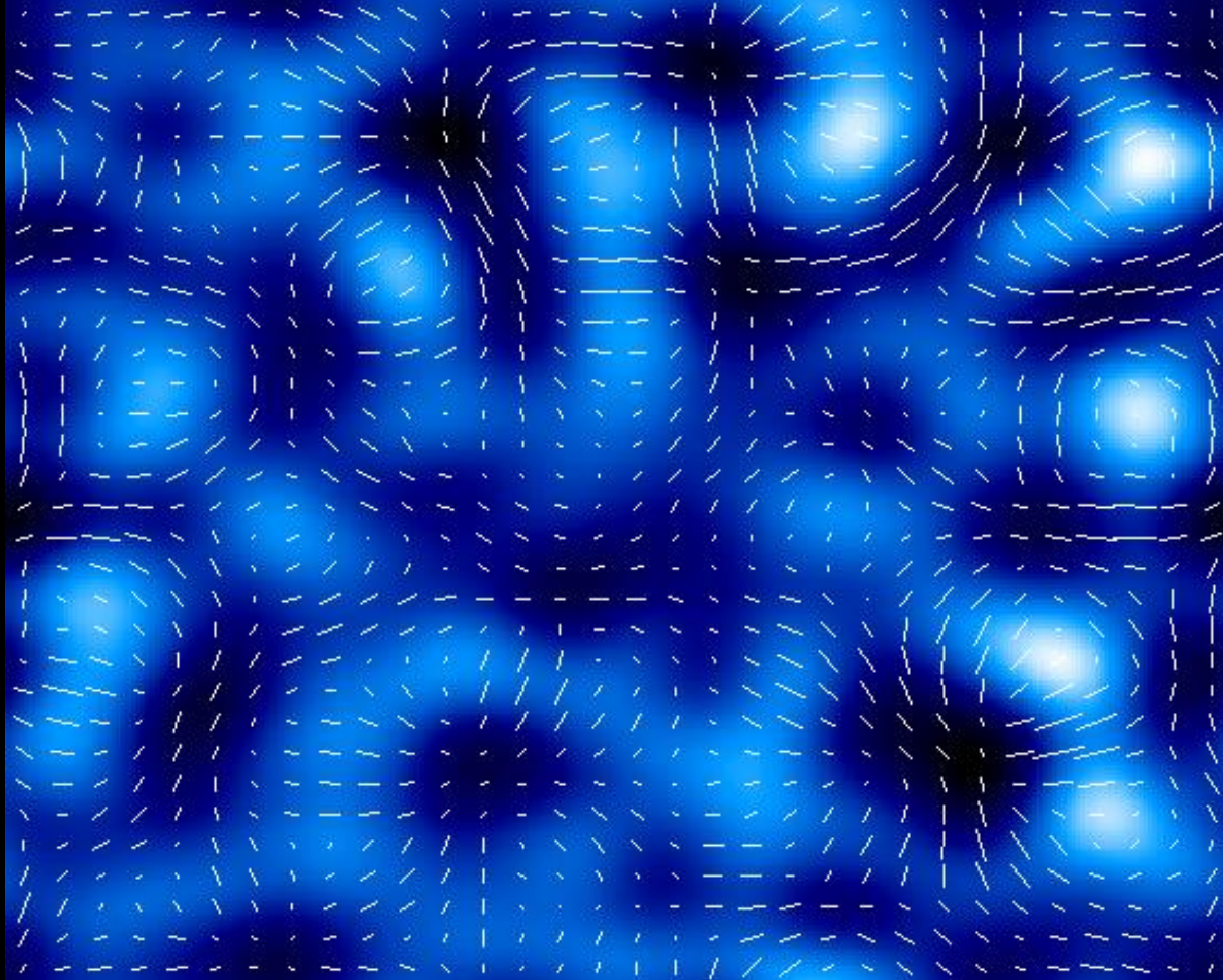


credits: Sarah Bridle

Shear Map



credits: Sarah Bridle



credits: Sarah Bridle

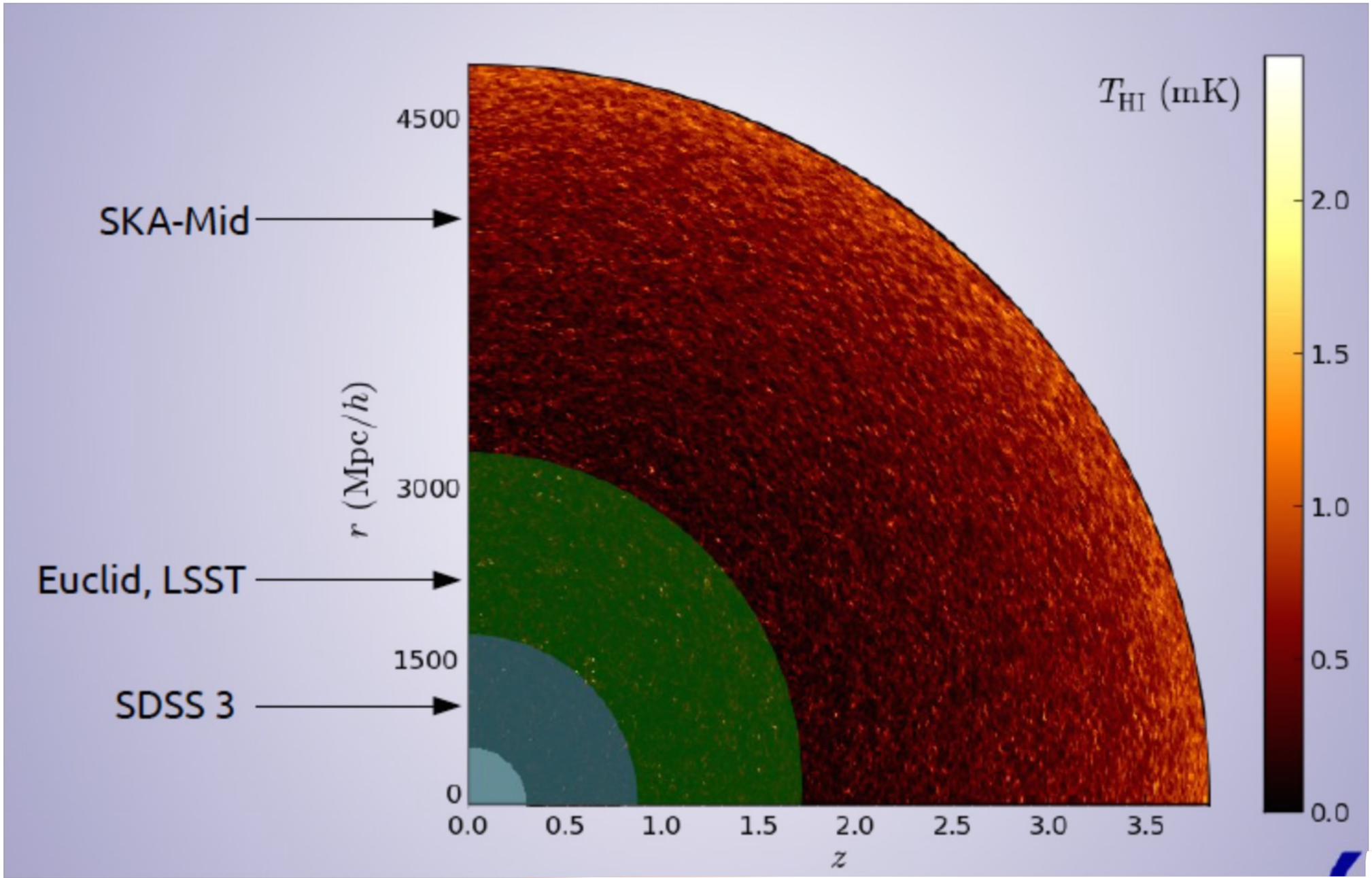
Autres sondes observationnelles :

- **Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)**
- **Lyman-alpha forest**
- **Optical weak lensing**
- **21 cm**
- **...**

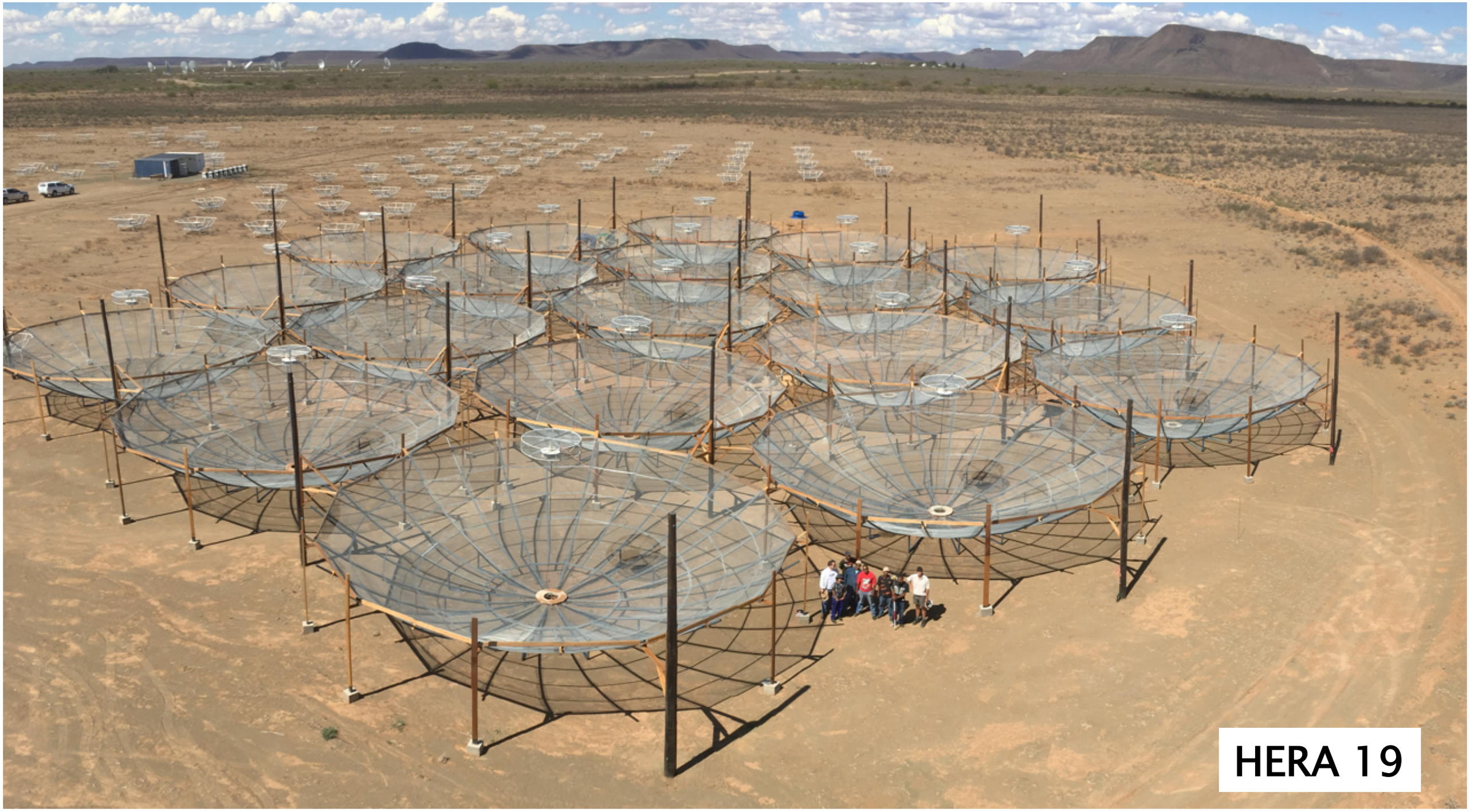
from Mário G. Santos

SKA1–MID: Cosmology with HI IM

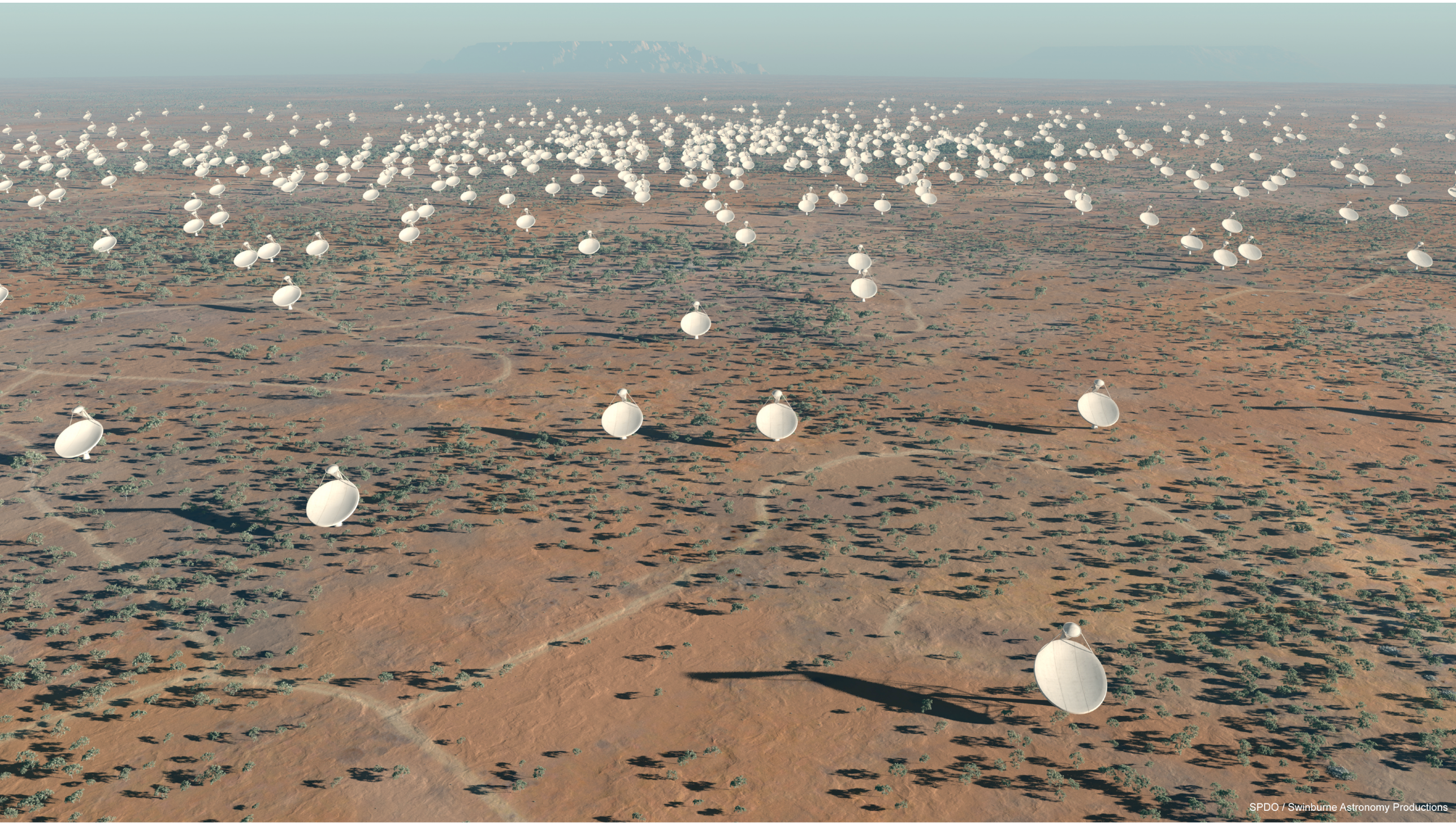
- Competitive with large redshift surveys for “precision cosmology”
- Huge available volume/low resolution – ideal for large scale tests



The Present...



The future



Square Kilometer Array (SKA)

Conclusions

- l'observation des plus grandes échelles se réalise dans le cadre du modèle standard de la cosmologie — lui-même basé sur la relativité générale ainsi que sur l'homogénéité et l'isotropie de notre Univers
- le contenu énergétique et la géométrie de l'Univers dicte l'expansion de l'Univers
- la cosmologie observationnelle consiste à trouver des règles standards pour comprendre le taux d'expansion à différents instants de l'histoire cosmique
- la détection du fond diffus cosmologique (ou CMB), est une preuve observationnelle éclatante du modèle standard
- cela pose toutefois des questions sur la naissance des fluctuations primordiales de la métrique ➔ théorie de l'inflation
- la cosmologie contemporaine utilise toutes les sondes observationnelles possibles, et est un mélange de développements instrumentaux, outils statistiques et numériques, traitements de grands volumes de données
  ➔ c'est passionnant !