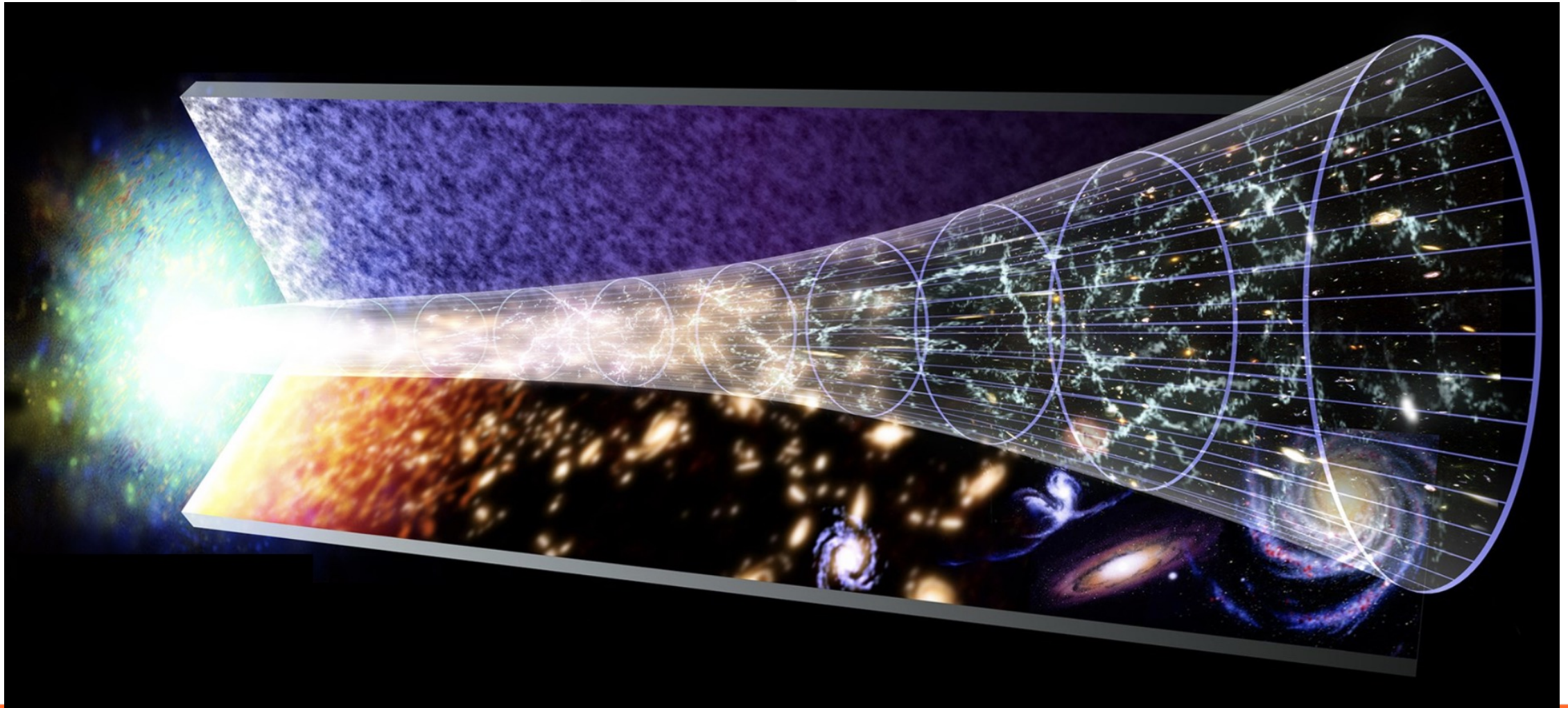
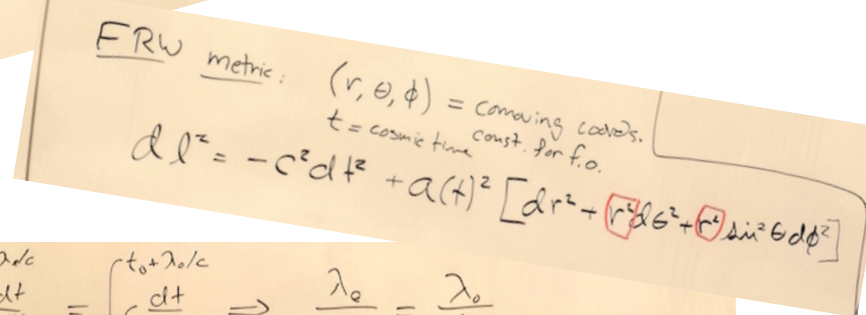
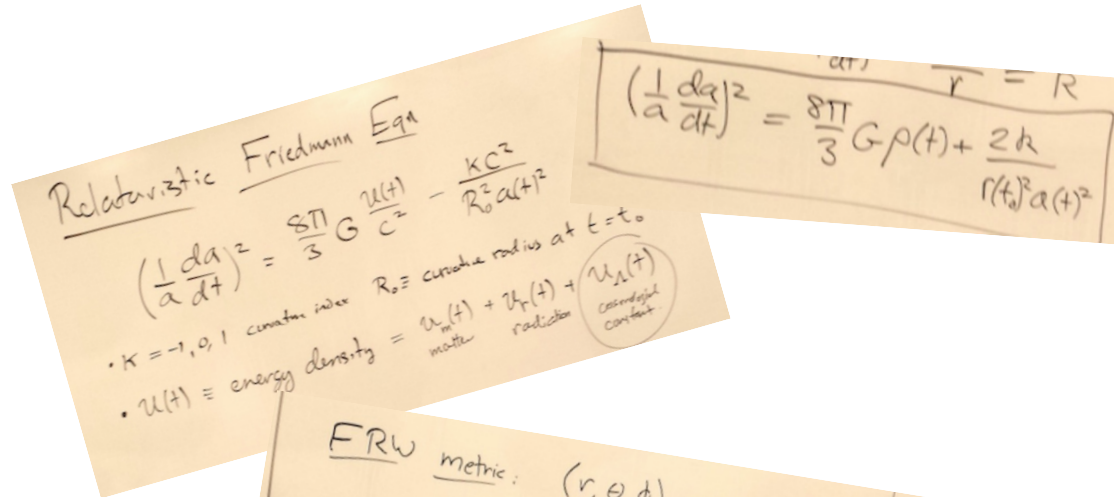
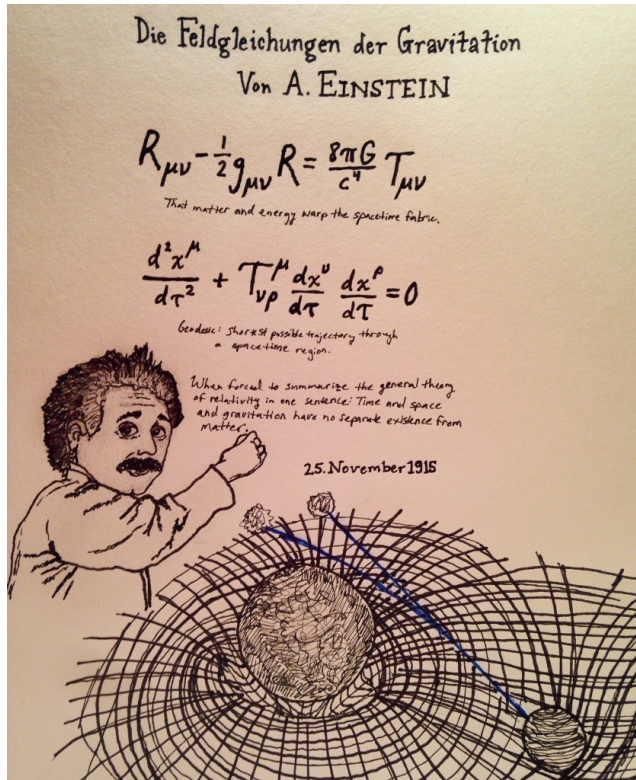


Une relique du Big Bang: le fond diffus cosmologique



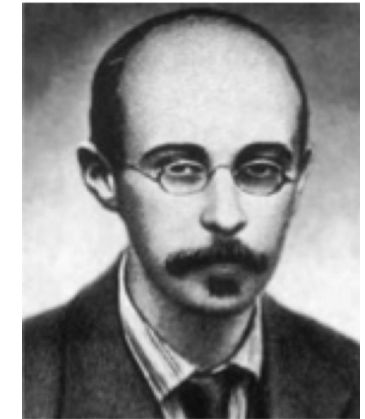
Un peu d'histoire

- ⇒ 1905-1915: Albert Einstein publie la relativité générale
- ⇒ 1917: V. Slipher montre que la plupart des galaxies s'éloignent de nous
- ⇒ 1922: Alexandre Friedmann décrit un Univers en expansion à partir des équations de la relativité générale
- ⇒



$$\int_{t_e}^{t_0 + \lambda_0/c} c \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_0}^{t_0 + \lambda_0/c} c \frac{dt}{a(t)} \Rightarrow \frac{\lambda_0}{a(t_0)} = \frac{\lambda_e}{a(t_e)}$$

$$\frac{a(t_0)}{a(t_e)} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} \equiv 1+z \quad \text{QSO at } z=6.4 \quad \frac{a(t_0)}{a(t_1)} = 1+z=7.4$$

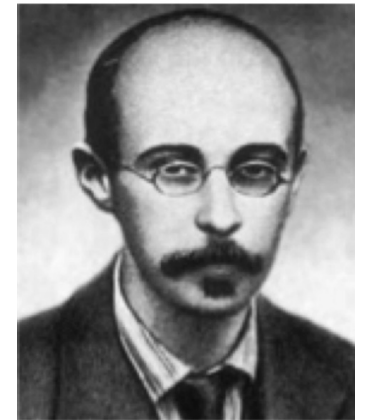
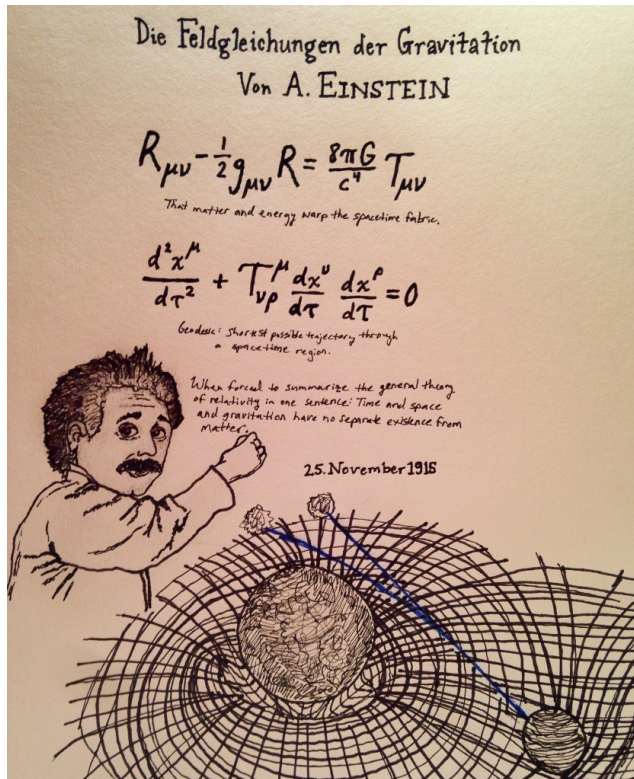


Un peu d'histoire

- ⇒ 1905-1915: Albert Einstein publie la relativité générale
- ⇒ 1917: V. Slipher montre que la plupart des galaxies s'éloigne de nous
- ⇒ 1922: Alexandre Friedmann décrit un Univers en expansion à partir des équations de la relativité générale
- ⇒



C'est la naissance de la
Cosmology



Un peu d'histoire

- ⇒ 1905-1915: Albert Einstein publie la relativité générale
- ⇒ 1917: V. Slipher montre que la plupart des galaxies s'éloigne de nous
- ⇒ 1922: Alexandre Friedmann décrit un Univers en expansion à partir des équations de la relativité générale
- ⇒ 1929: Découverte de l'expansion de l'Univers par Hubble
- ⇒



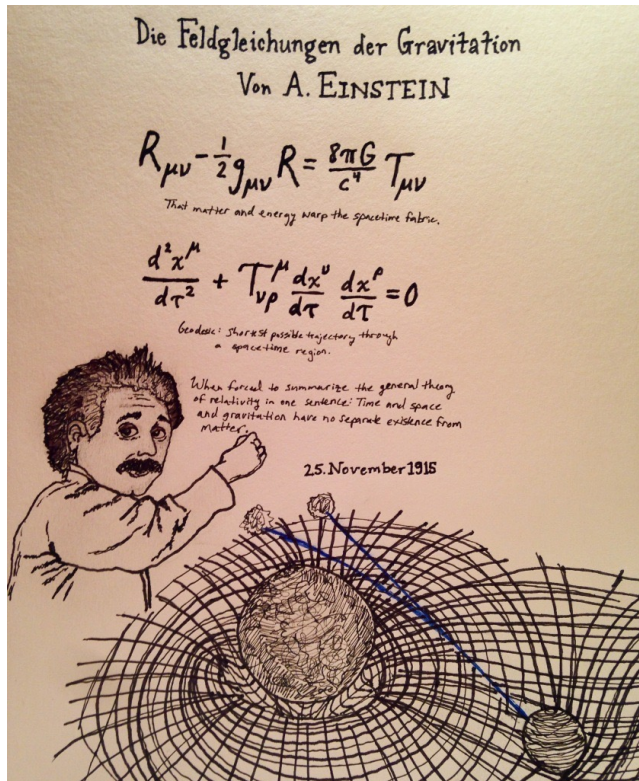
C'est la naissance de la

Cosmology

~~**Astronomy**~~

~~**Astrophysics**~~

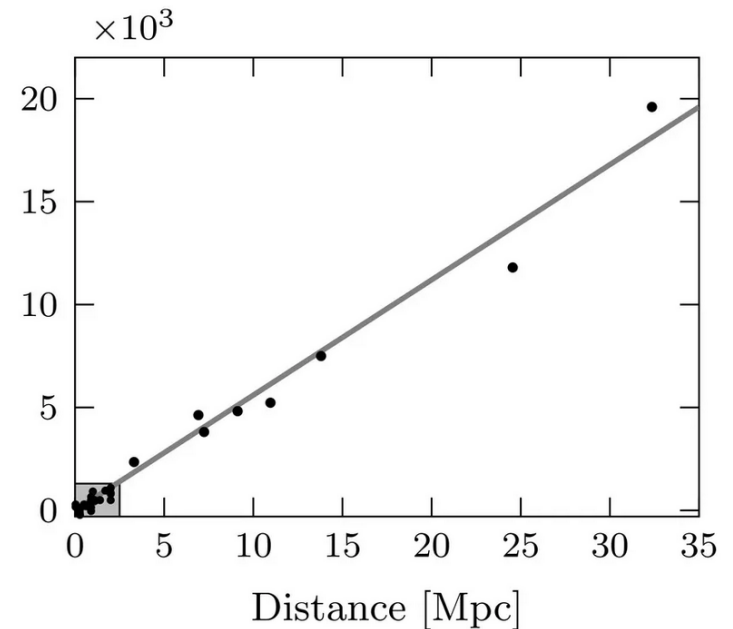
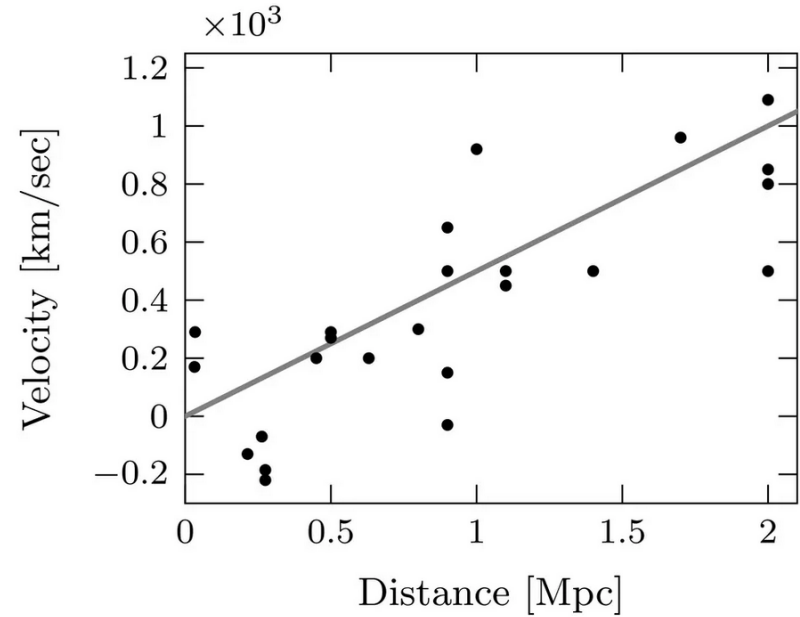
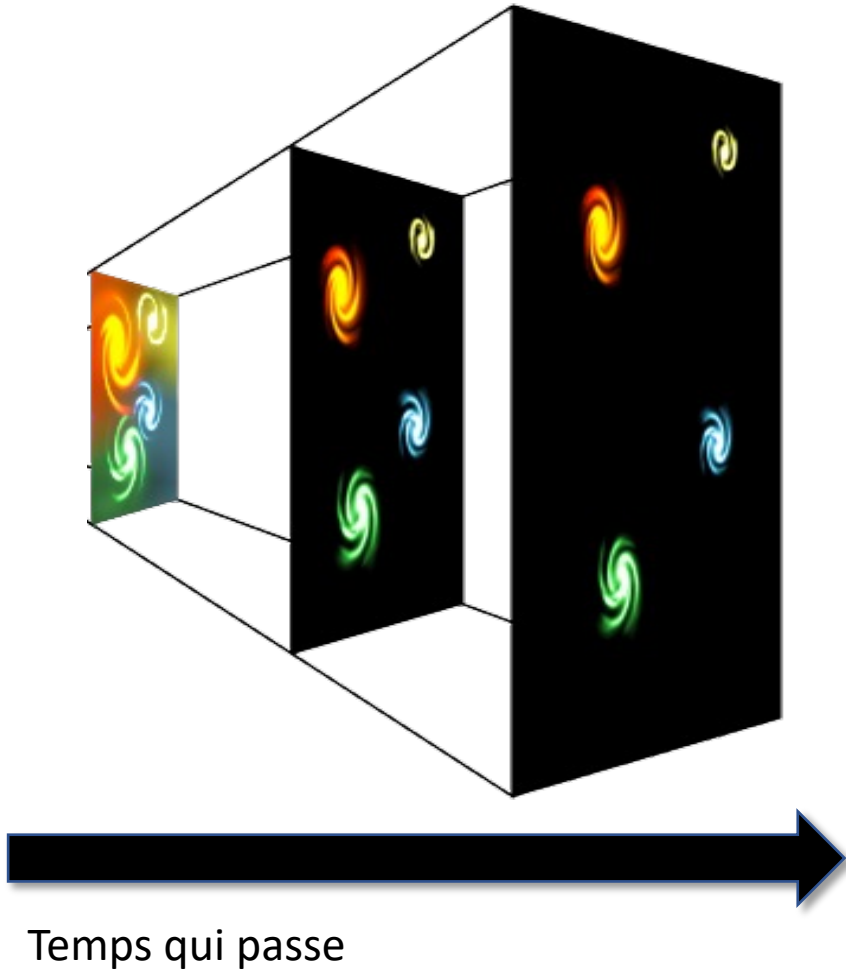
La cosmologie est une branche de la physique qui vise à étudier l'origine et l'évolution de l'univers dans son ensemble.



Des observations à la théorie

Observation

les galaxies s'éloignent les unes des autres
La "loi de Hubble"

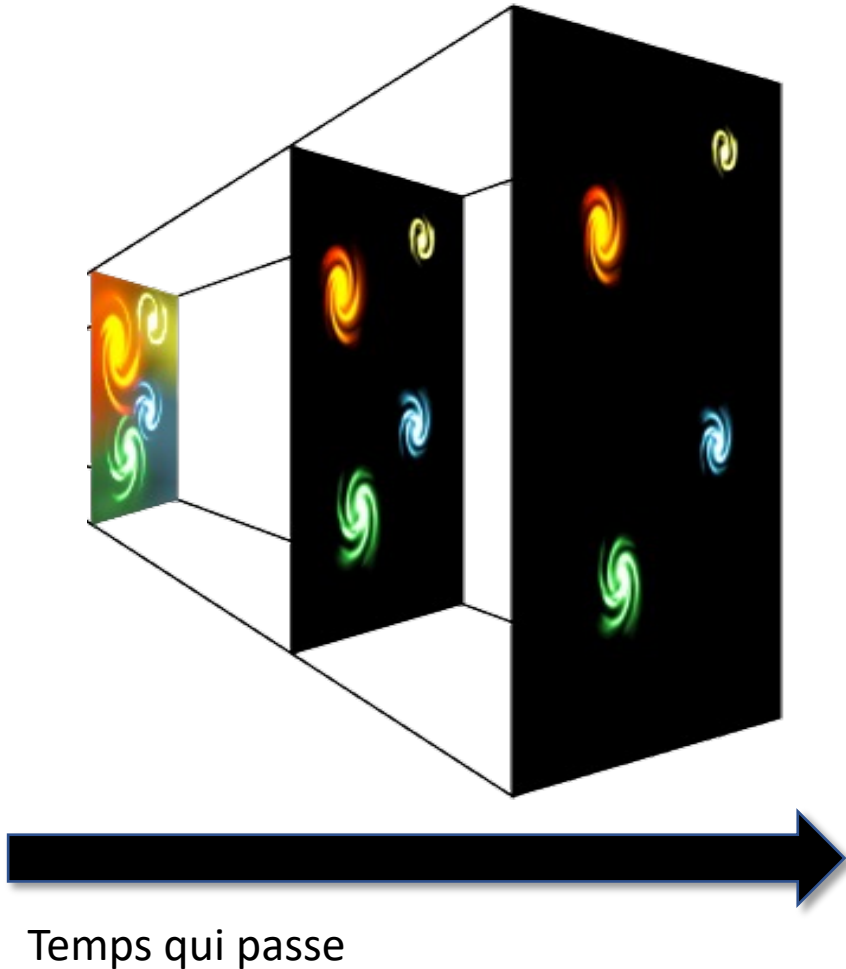


Hubble (1929)
Hubble and Hummerson (1932)

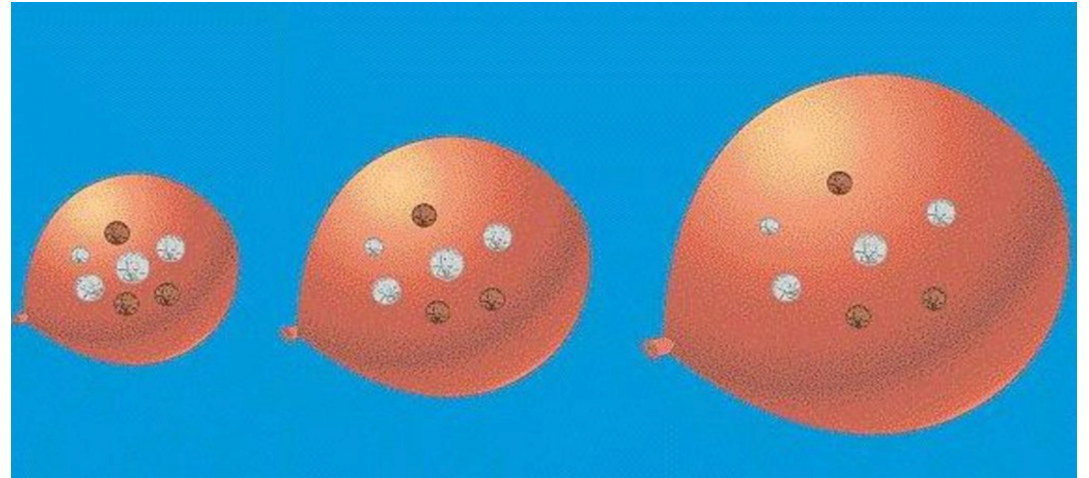
Des observations à la théorie

Observation

les galaxies s'éloignent les unes des autres
La "loi de Hubble"



« Avec les mains »

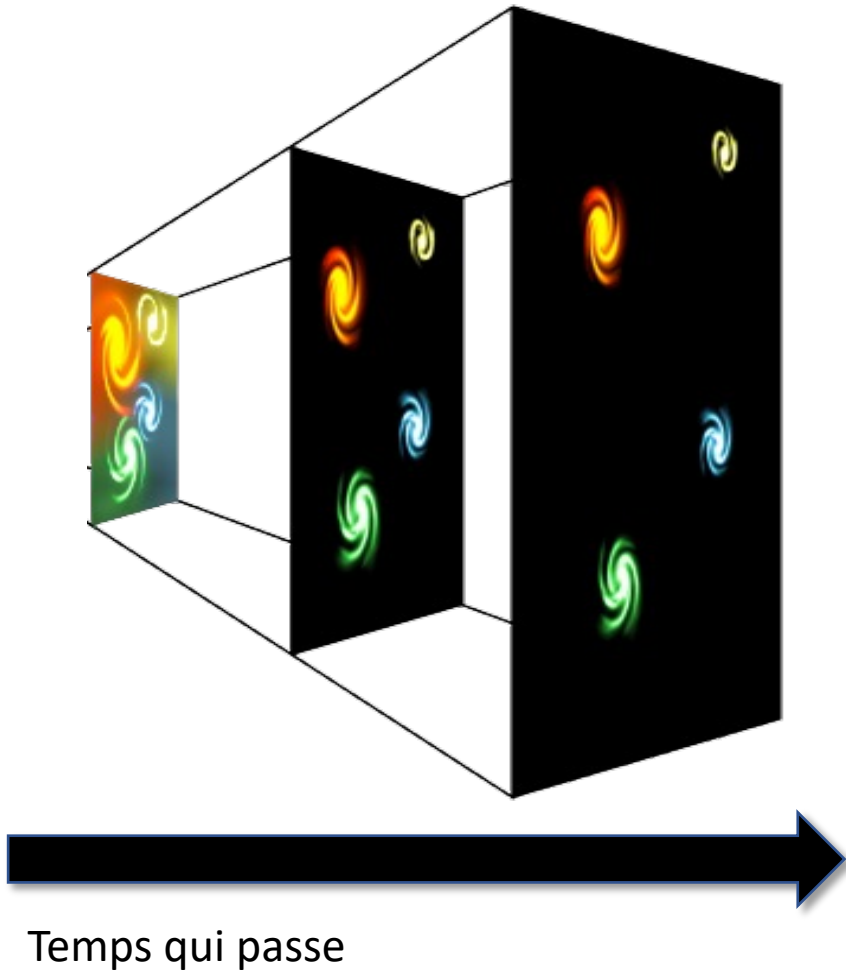


- Expansion de l'Univers ("l'espace se dilate au cours du temps")
- Plus on remonte dans le temps plus l'Univers était **dense** et **chaud** (on y reviendra plus tard)

Expansion de l'Univers

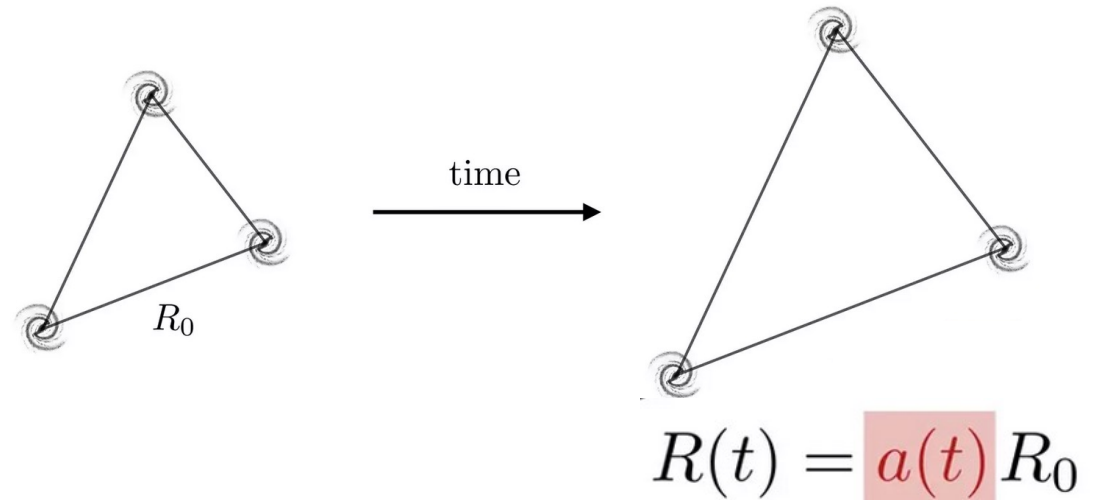
Observation

les galaxies s'éloignent les unes des autres
La "loi de Hubble"



Mise en équation

En relativité générale, cela peut être interprété comme une expansion de l'espace



Facteur
d'échelle

$$V \equiv \dot{R} = \frac{\dot{a}}{a} R \equiv H R$$

Hubble parameter

A quoi correspond le paramètre de Hubble ?



Vous observez une voiture qui s'éloigne.

Vous mesurez qu'elle a une vitesse de 60 kilomètres à l'heure, à une distance d'un kilomètre (elle roule à vitesse constante)

=> Alors elle roule depuis 1 minute

A quoi correspond ce paramètre de Hubble ?



Vous observez une voiture qui s'éloigne.

Vous mesurez qu'elle a une vitesse de 60 kilomètres à l'heure, à une distance d'un kilomètre (elle roule à vitesse constante)

=> Alors elle roule depuis 1 minute

$$V \equiv \dot{R} = \frac{\dot{a}}{a} R \equiv H R$$

Si on est capable de mesurer la constante de Hubble aujourd'hui, au premier ordre (si on considère que la vitesse d'expansion de l'Univers est constante) on peut en déduire son âge:

$$H_0 = (68 \pm 2) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$t_H \equiv H_0^{-1} = (14.38 \pm 0.42) \text{ Gyrs}$$

Un petit exercice...

Considérons une région sphérique dans un univers homogène.

En utilisant les équations de la gravité Newtonienne, on peut écrire la force exercée sur la particule de masse m à la surface de la sphère :

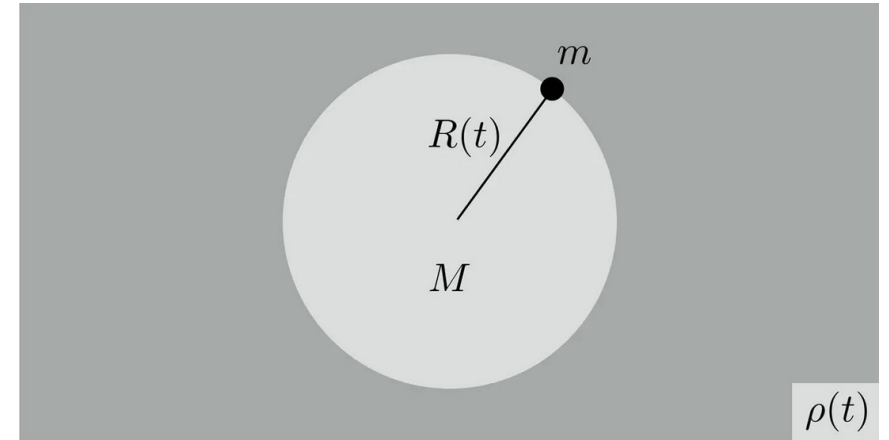
$$F = -\frac{GMm}{R^2}$$

Et l'accélération :

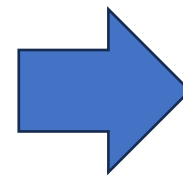
$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2}$$

On intègre:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{R} = U$$



En remplaçant $M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$ et $R(t) = a(t) R_0$



$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{2U}{R_0^2} \frac{1}{a^2}$$

Hubble
parameter

**Friedmann
Equation**

Mais ...cette constante ?

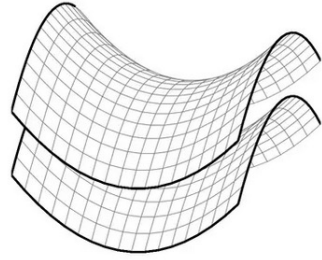
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{2U}{R_0^2} \frac{1}{a^2}$$

Friedmann Equation

Hubble parameter

Relativité Générale

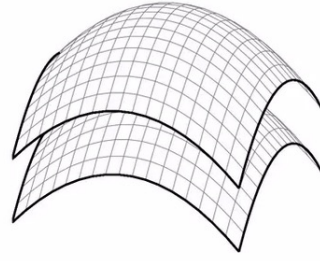
$$U > 0$$



negatively curved

Expansion Éternelle
« Univers ouvert »

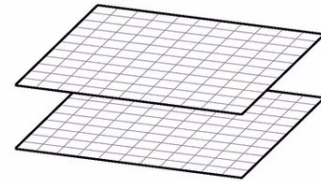
$$U < 0$$



positively curved

Arrêt de l'expansion et effondrement
« Univers fermé »

$$U = 0$$



flat

« Univers plat »
L'expansion s'arrêtera après une période de temps infinie

Préféré par les données

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

Quelques ordres de grandeurs

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

Quelques ordres de grandeurs

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

Si on est capable de mesurer la constante de Hubble aujourd'hui:

$$H_0 = (68 \pm 2) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

On peut en déduire la densité moyenne de l'Univers aujourd'hui:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 0.8 \times 10^{-29} \text{ grams cm}^{-3} \\ &= 1.3 \times 10^{11} M_\odot \text{ Mpc}^{-3} \\ &= 5.1 \text{ protons m}^{-3} \end{aligned}$$

et...la Relativité Générale ?

En relativité générale, l'équation de Friedmann vient de l'équation d'Einstein:

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

Curvature tensor Energy-momentum tensor

Géométrie de l'espace temps
 $R_{\mu\nu}$ déformation,
 R courbure,
 $g_{\mu\nu}$ longueurs et angle

Contenu energie-matiere
 G la constante gravitationnelle
 $T_{\mu\nu}$ Tenseur energie-impulsion: repartition energie-masse

Si on rajoute une constante cosmologique (« l'énergie du vide ») on a:

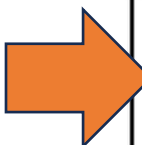
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

et...la Relativité Générale ?

En relativité générale, l'équation de Friedmann vient de l'équation d'Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

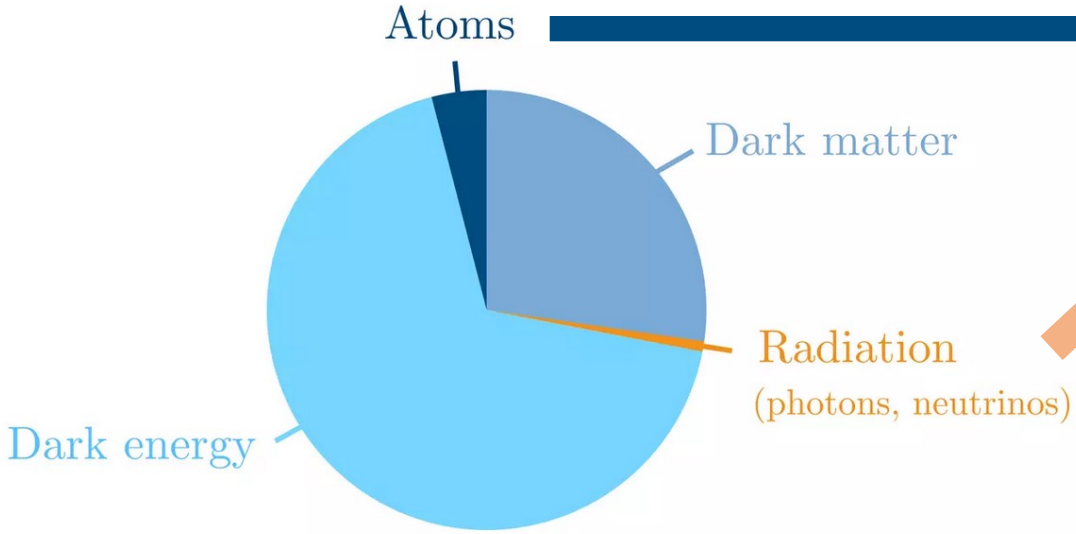
Curvature tensor \curvearrowright Energy-momentum tensor

 $H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$

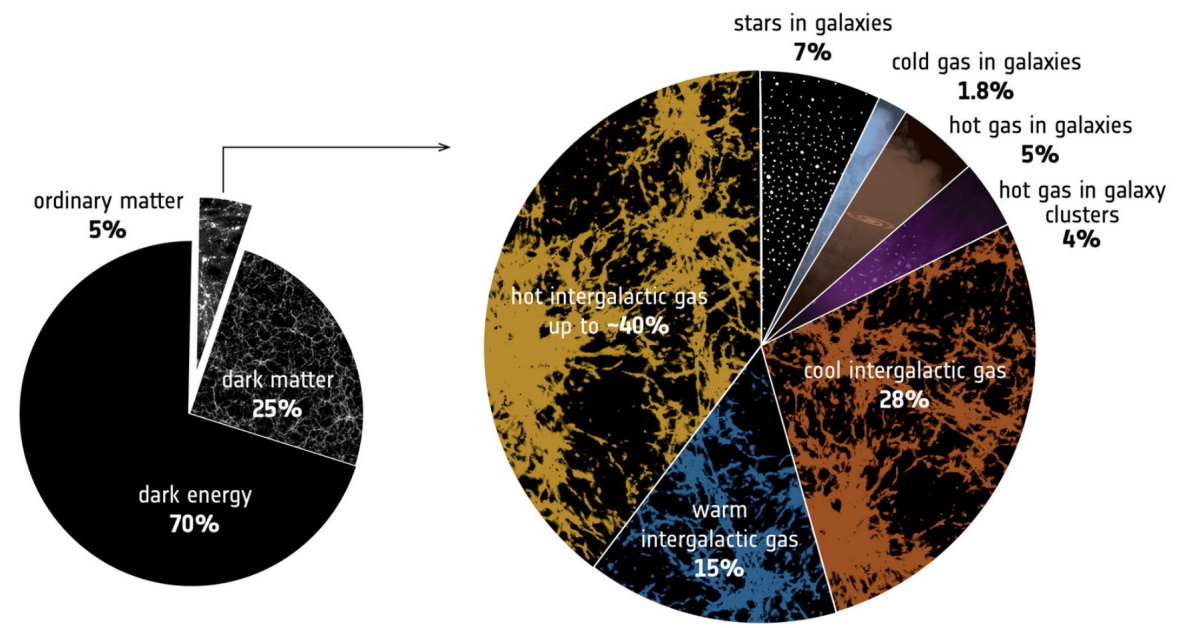
Ou on remplace la densité de masse par la densité d'énergie

 Pour résoudre l'équation de Friedmann on doit **connaitre les différentes densités d'énergie** dans l'Univers et **calculer comment elles évoluent** avec l'expansion de l'Univers.

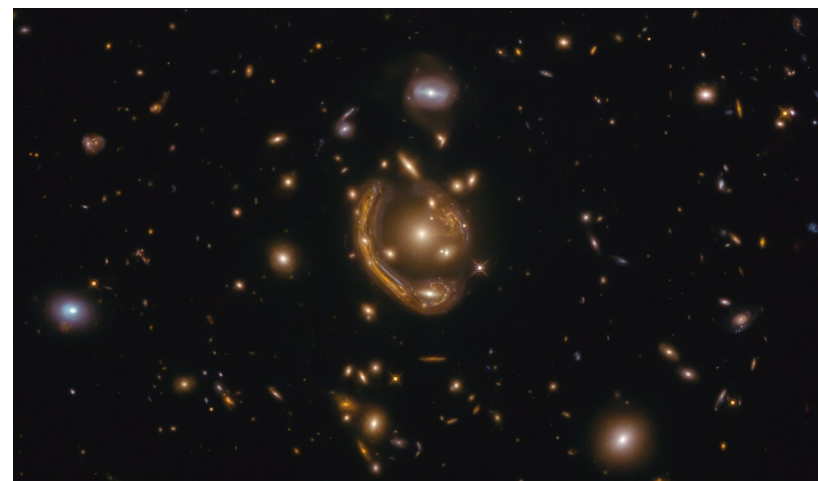
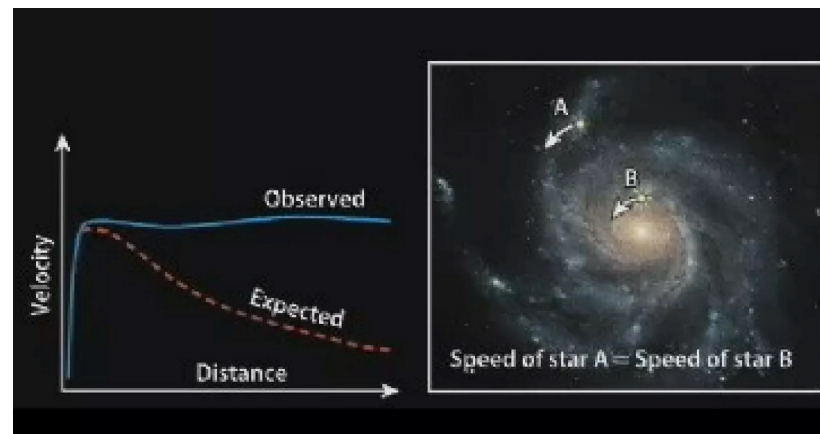
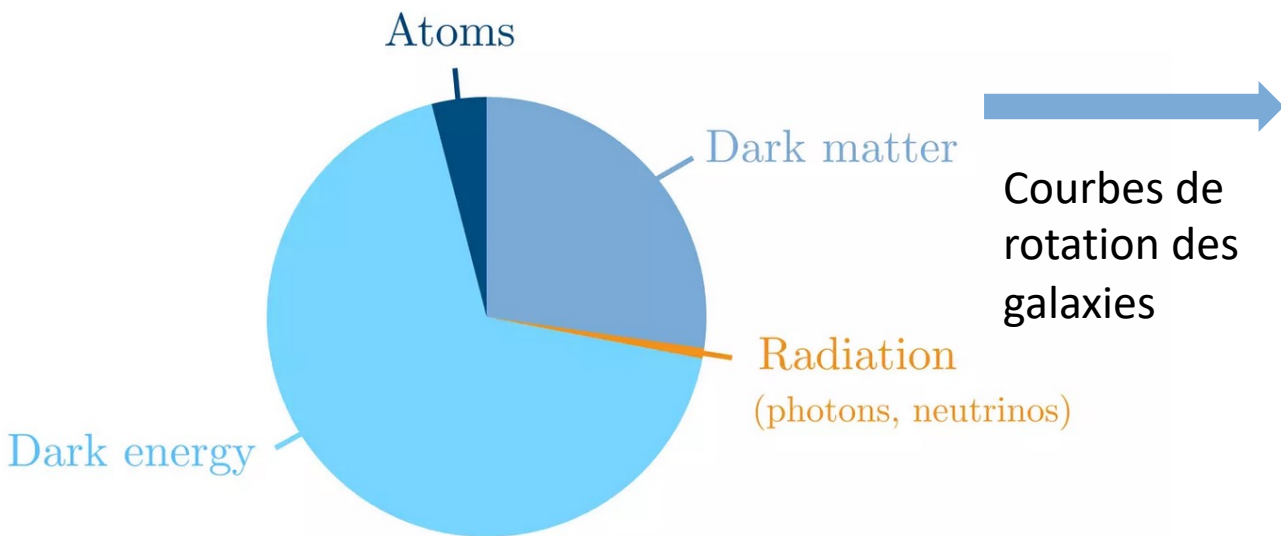
Différentes densités d'énergie ??



La matière ordinaire !
 Souvent appelée « matière baryonique », elle correspond aux protons, neutrons, + leptons, composant les atomes et molécules de l'Univers visible.

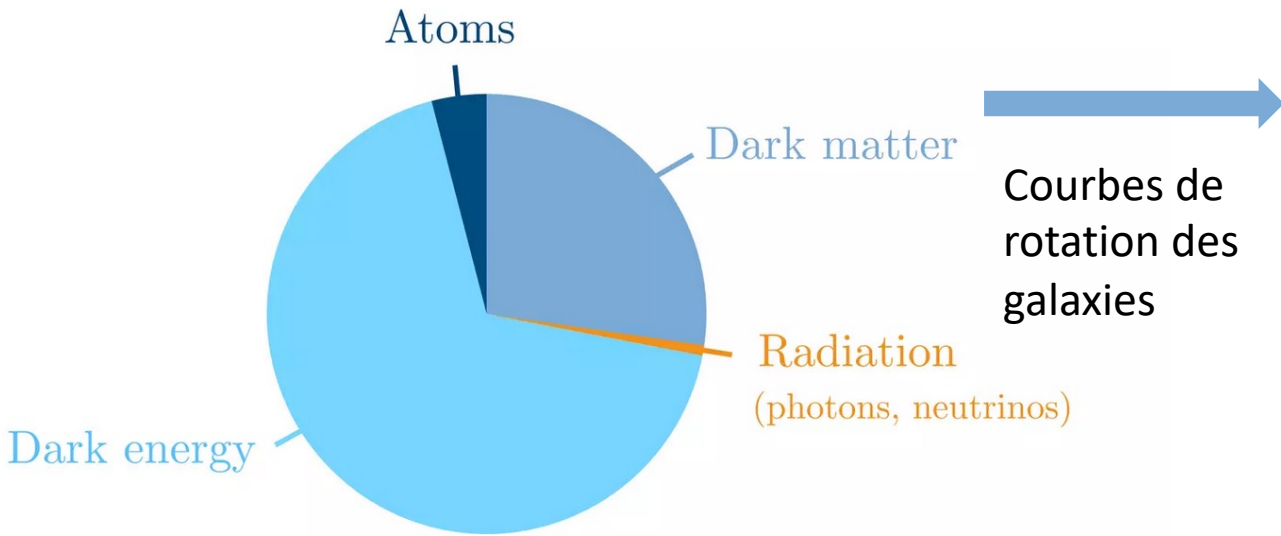


Différentes densités d'énergie ??

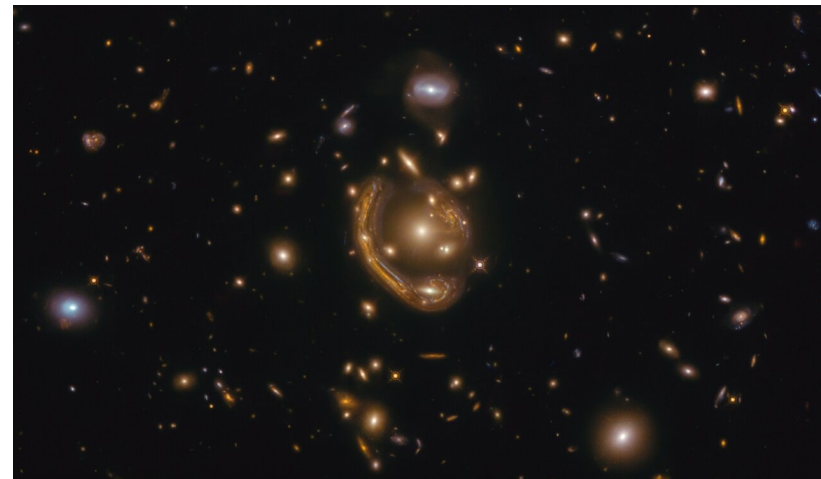
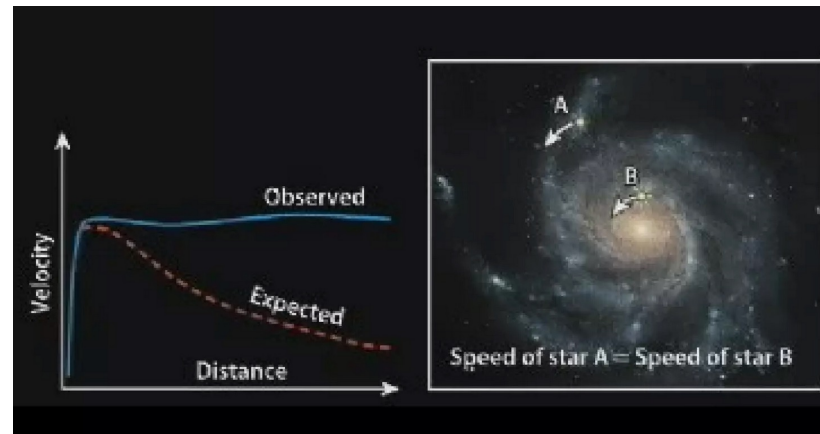


- n'absorbe ni n'émet de lumière
- a les mêmes propriétés gravitationnelles que la matière ordinaire

Différentes densités d'énergie ??



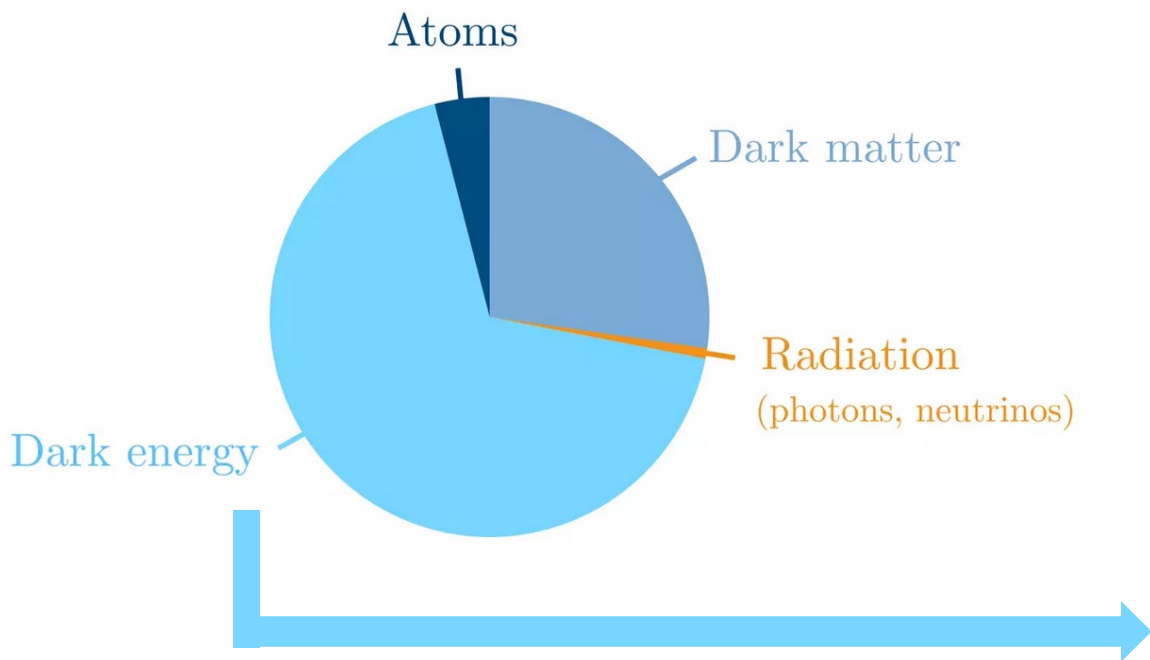
Courbes de rotation des galaxies



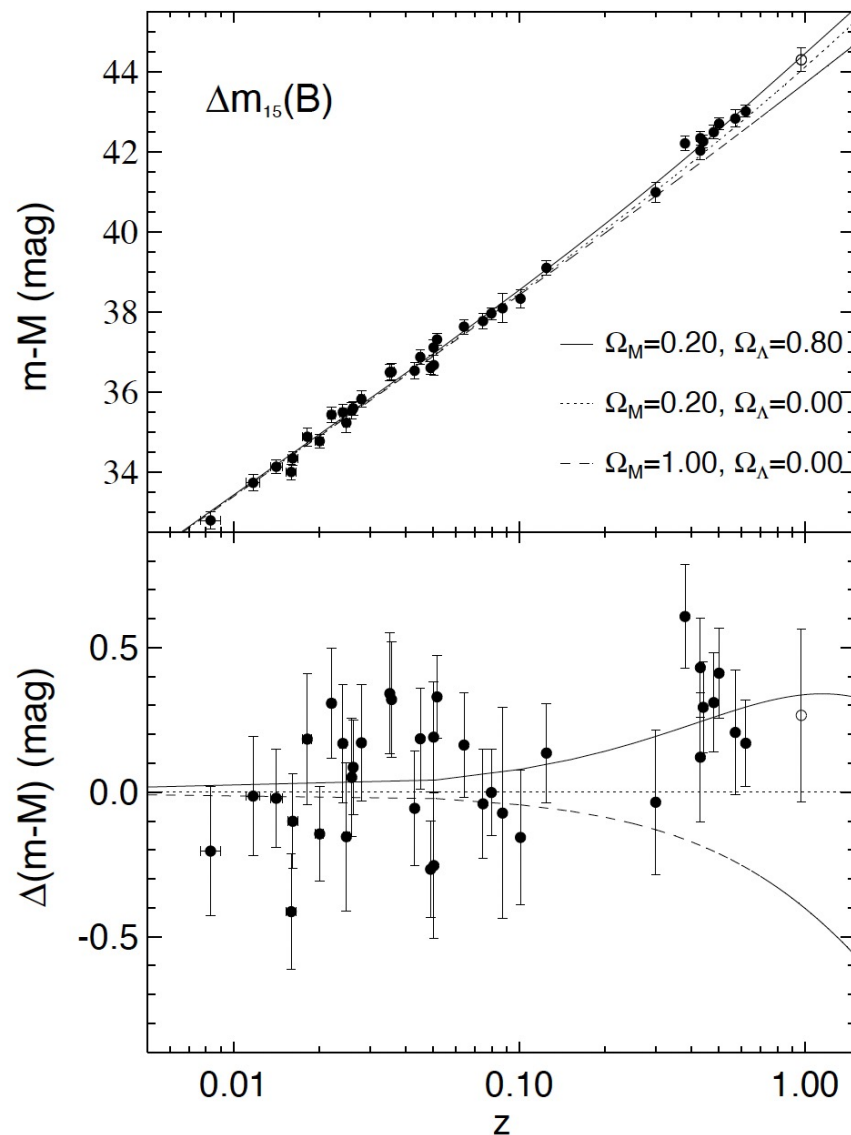
Une particule qui n'interagit que faiblement avec le reste de la matière ?
 Des trous noirs primordiaux ?
 Autre chose ?

- n'absorbe ni n'émet de lumière
- a les mêmes propriétés gravitationnelles que la matière ordinaire

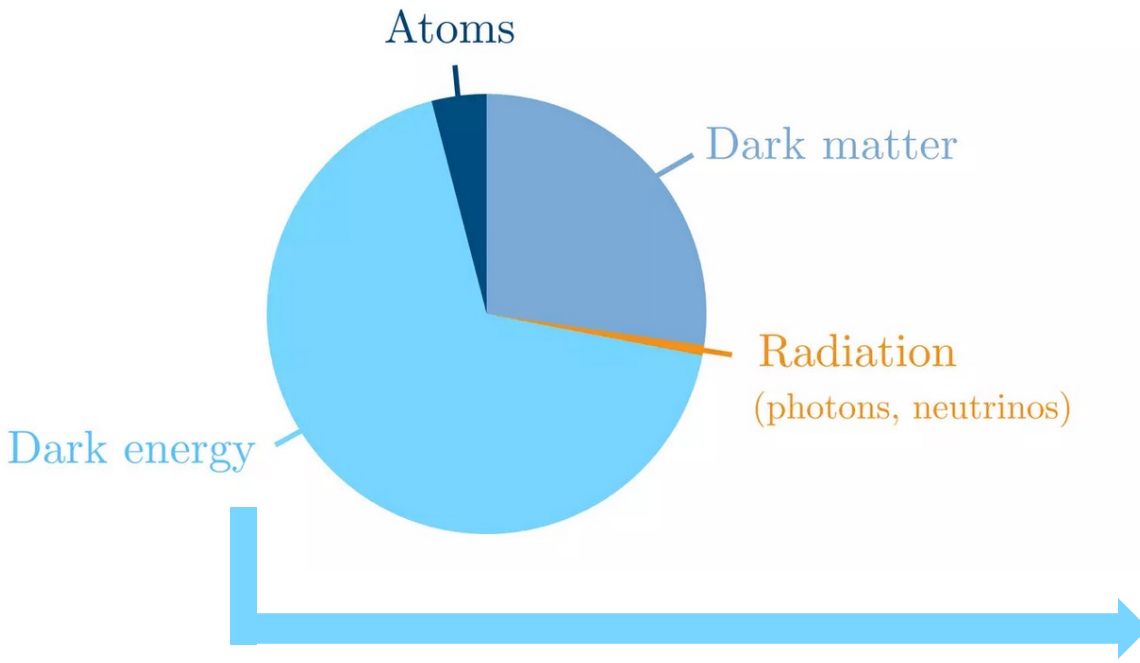
Différentes densités d'énergie ??



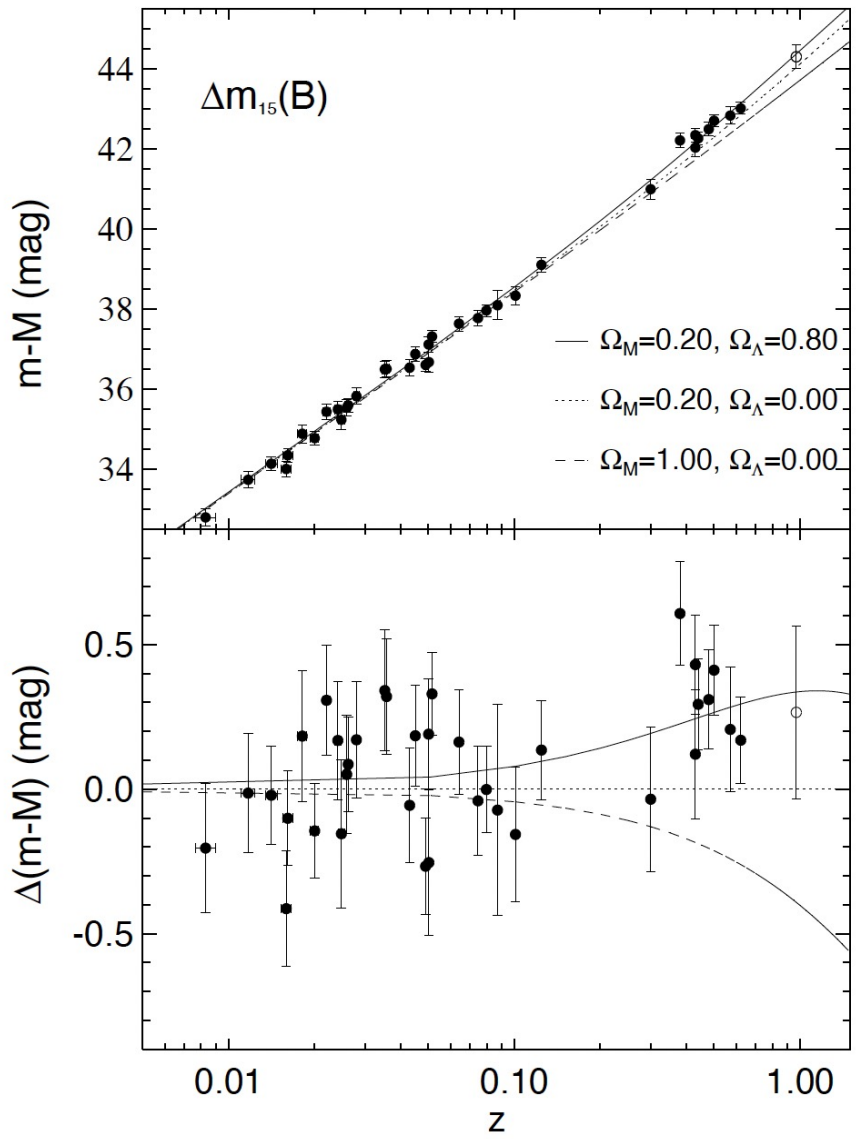
Courbes de luminosité de quelques supernovae et fit de la relation distance de luminosité-redshift



Différentes densités d'énergie ??



Courbes de luminosité de quelques supernovae et fit de la relation distance de luminosité-redshift



Une constante cosmologique ?
 Une modification des lois de la gravitation dans le cadre de la relativité générale ?
 Autre chose ?

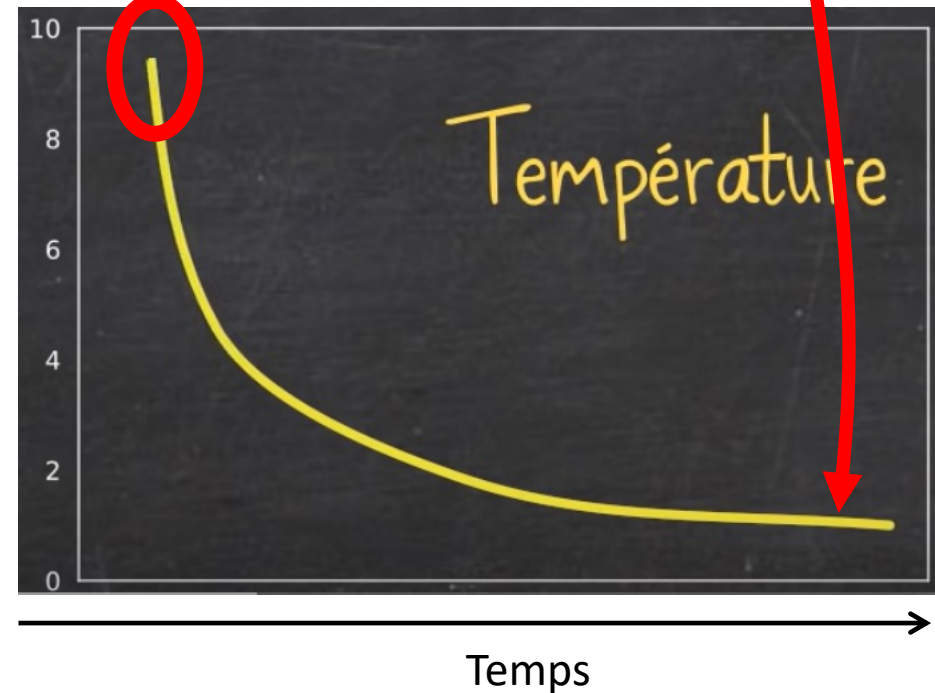
Et au tout début ?

Revenons sur le modele du ballon (Univers en expansion)

Une soupe de particules
élémentaires

mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS
					SCALAR BOSONS

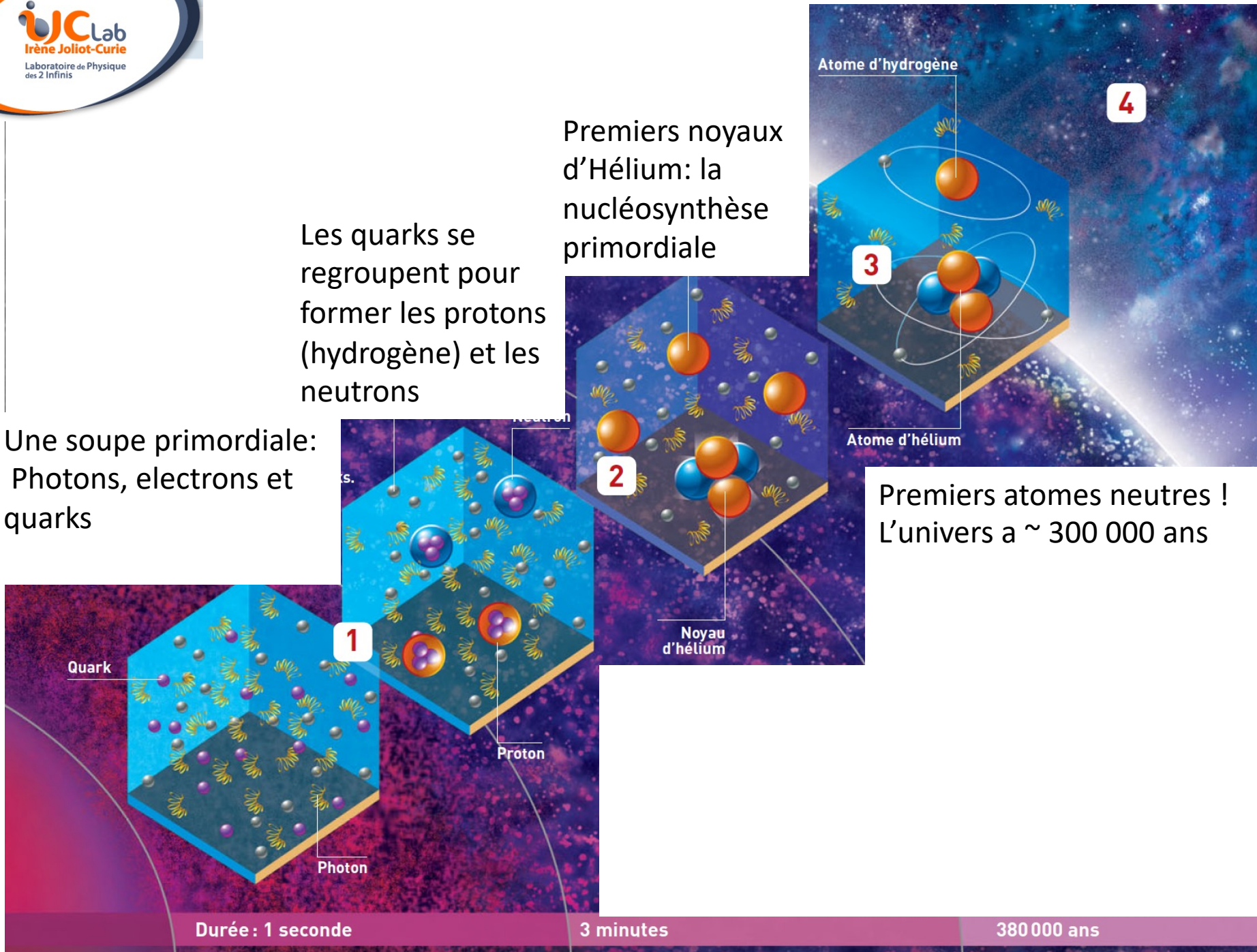
Nous aujourd'hui !



Les quarks se regroupent pour former les protons (hydrogène) et les neutrons

Premiers noyaux d'Hélium: la nucléosynthèse primordiale

Une soupe primordiale: Photons, électrons et quarks



Durée : 1 seconde

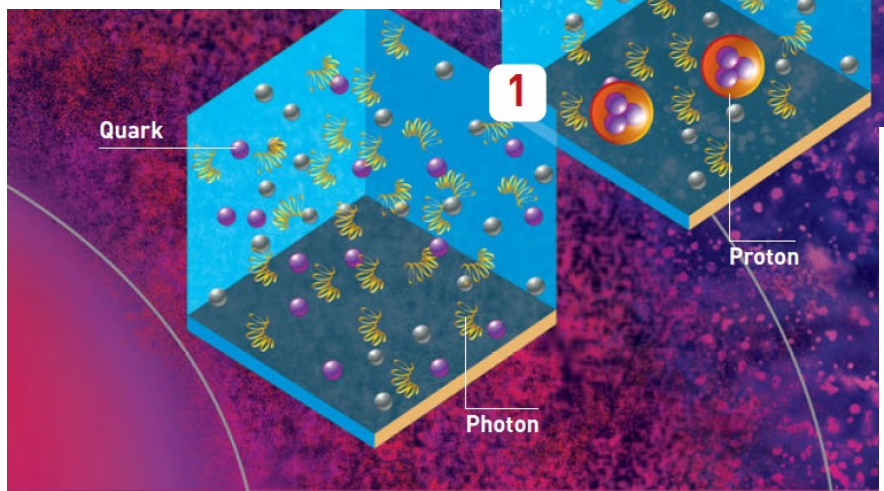
3 minutes

380 000 ans

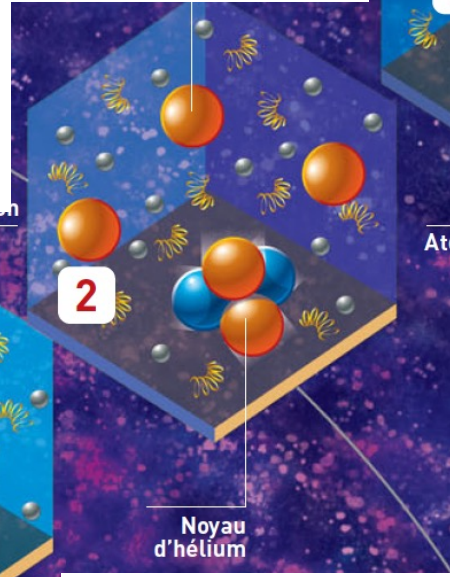
Les quarks se regroupent pour former les protons (hydrogène) et les neutrons

Premiers noyaux d'Hélium: la nucléosynthèse primordiale

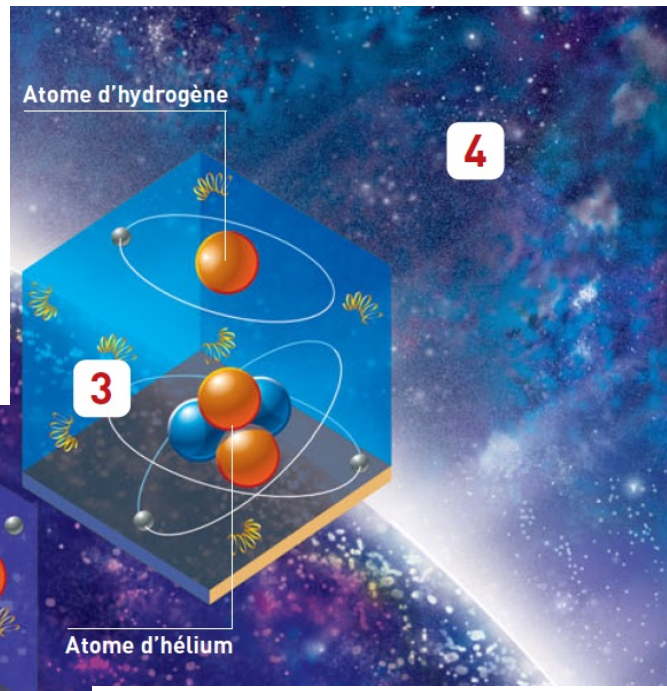
Une soupe primordiale: Photons, électrons et quarks



Durée : 1 seconde



3 minutes



Premiers atomes neutres !
L'univers a ~ 300 000 ans

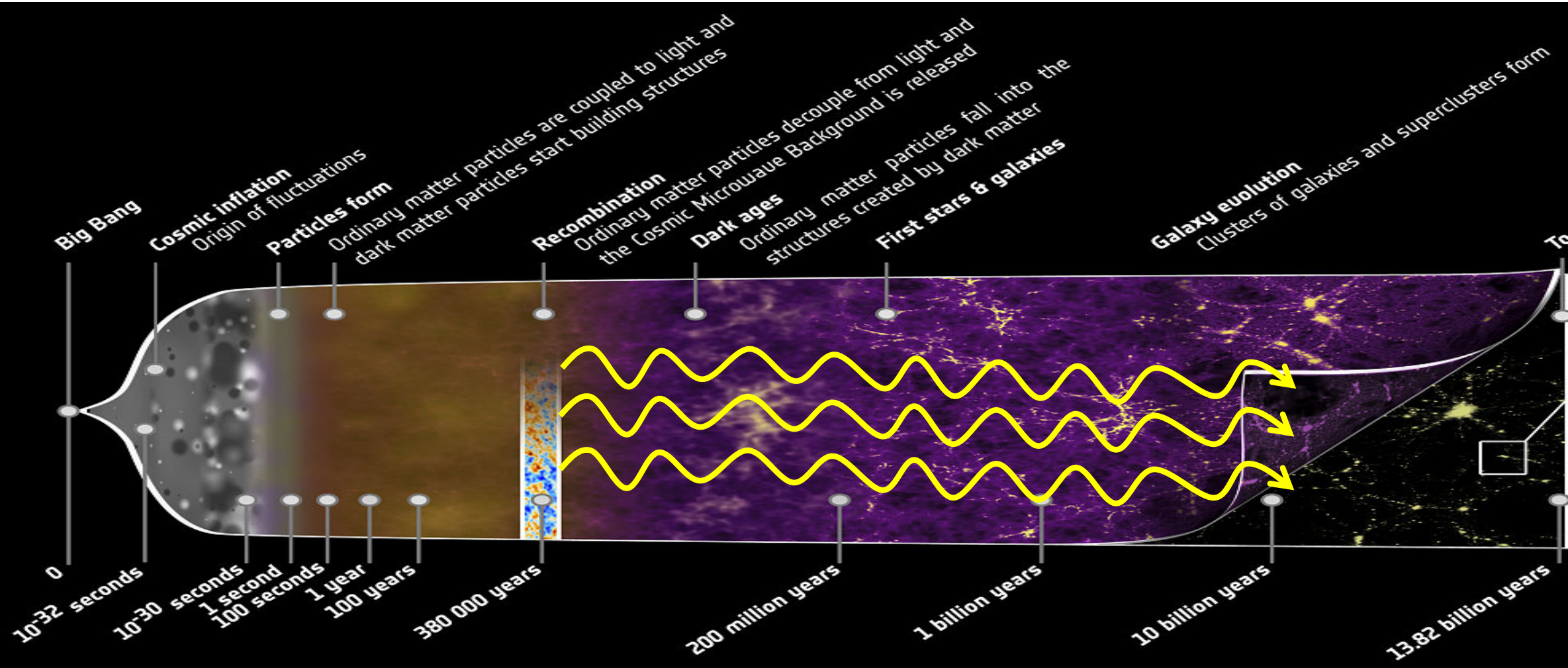
380 000 ans

Prédiction du modèle du Big Bang: les photons qui étaient prisonniers se propagent librement:
c'est le fond diffus cosmologique (CMB = Cosmic Microwave Background)
La première lumière de l'Univers !
T=3000K (Kelvin)
1K=-273 degré Celsius

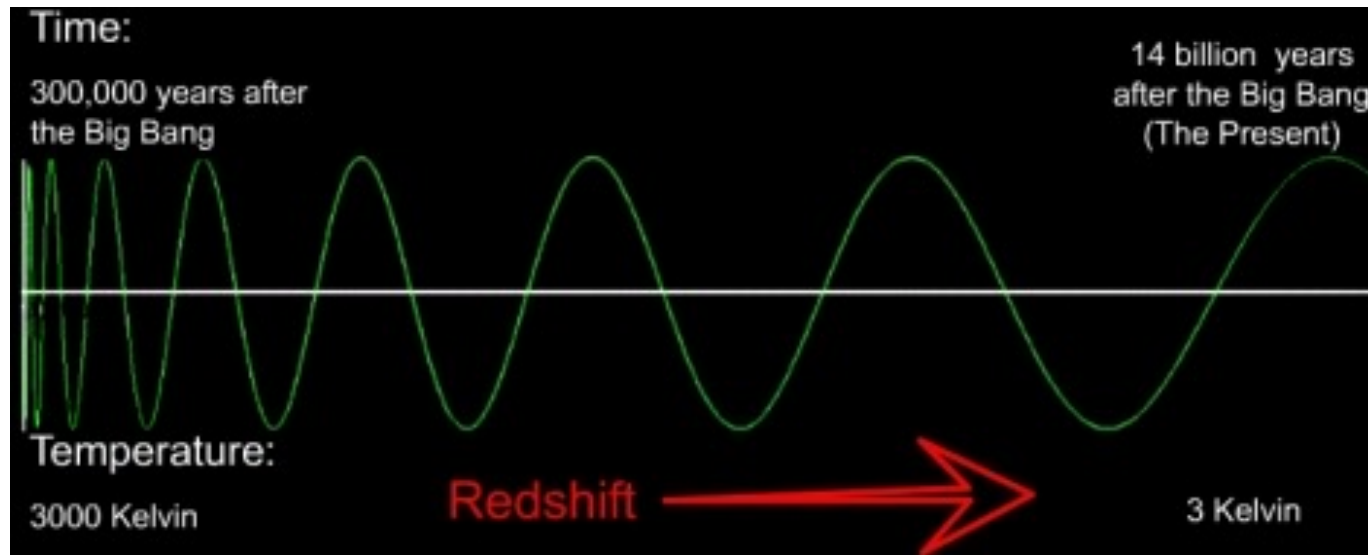
Mais que leur est-il arrivé à ces photons ?



Ces photons vont ensuite vivre leur vie et garder la mémoire de ce qu'ils ont rencontré au cours de leur chemin. Du coup si on les détecte : on vérifie une prédiction de la théorie du Big Bang et en plus on peut apprendre des choses sur l'histoire de l'Univers !

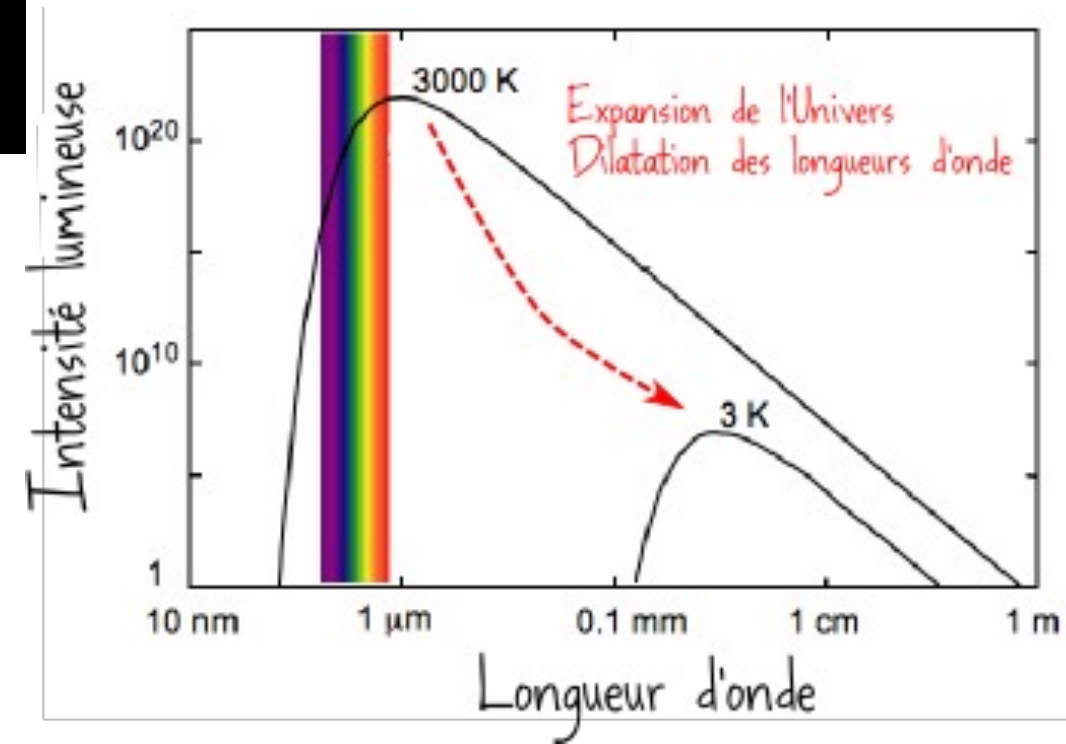


Alors...comment les observer ?



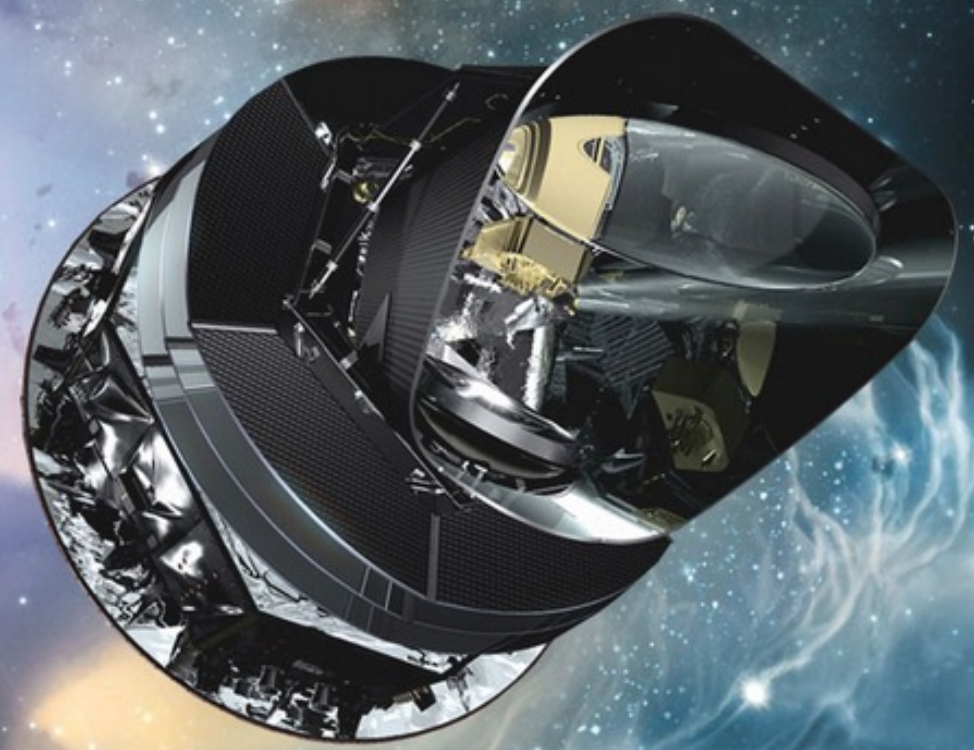
Ils sont plus froids !!
~ -271 Celsius (2.7 Kelvin)

Du coup leur longueur d'onde a changé !
On ne peut plus voir leur lumière avec notre oeil
Il faut un détecteur spécial !!

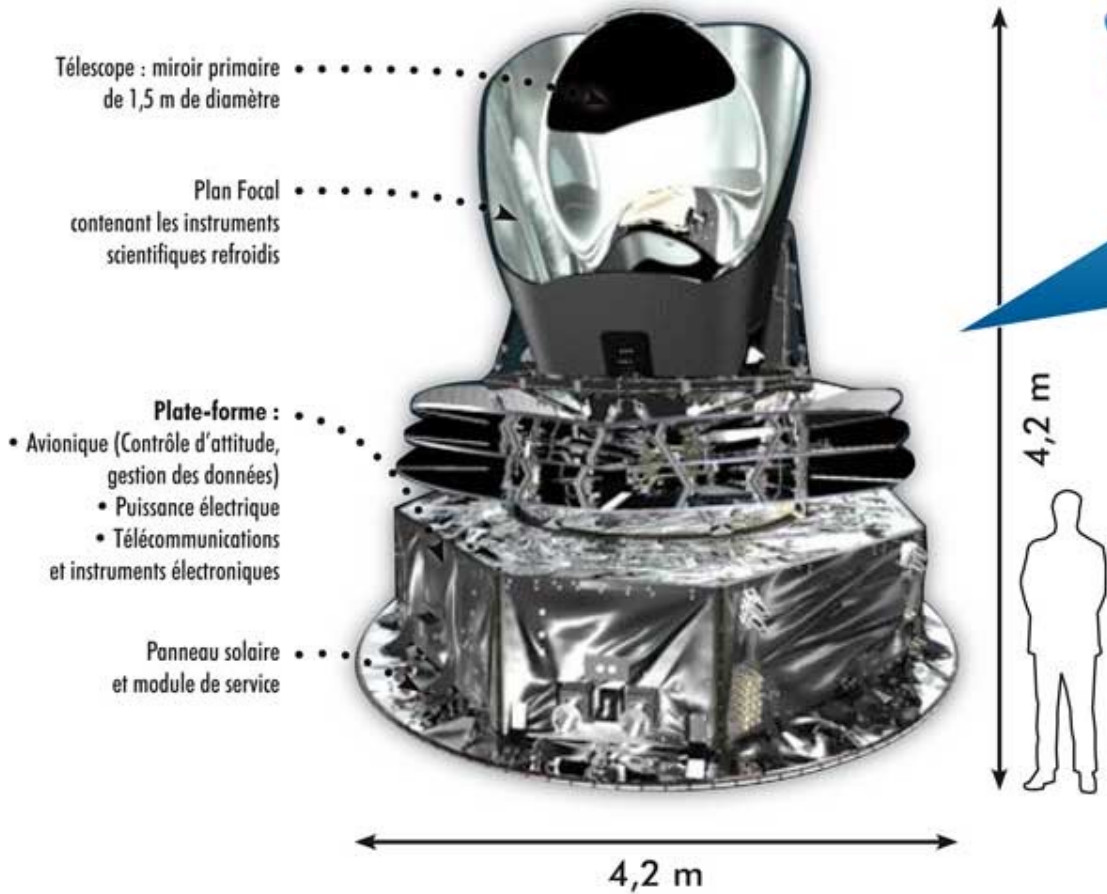


ON A OBSERVÉ CES PHOTONS!

Le Satellite
PLANCK !



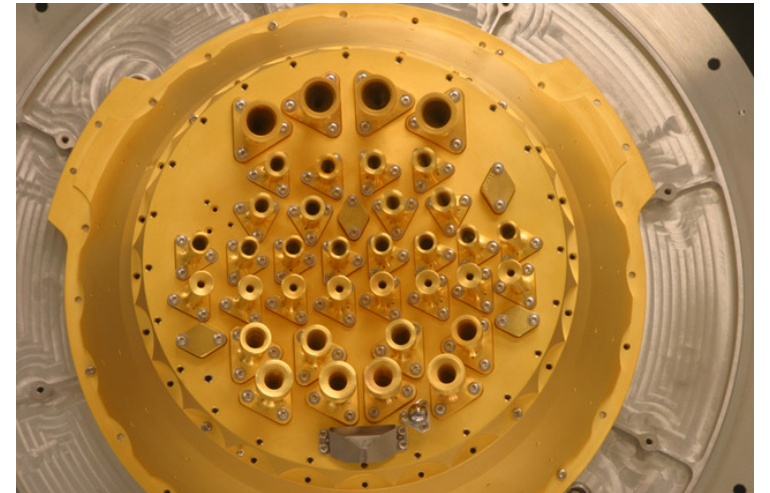
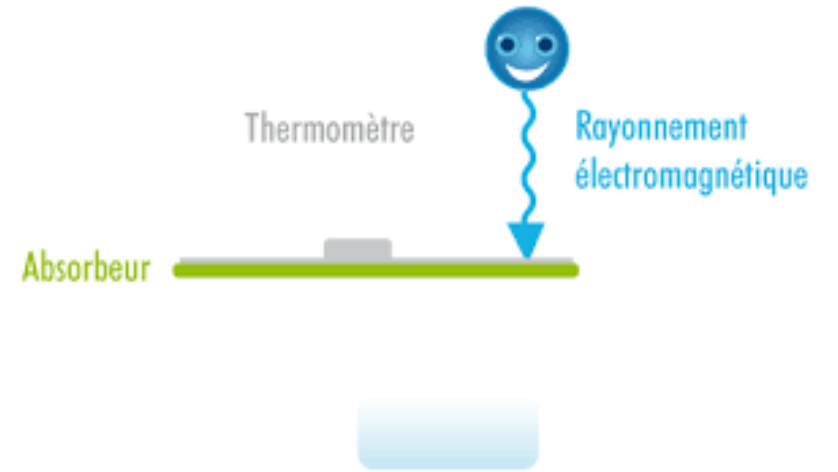
Le satellite Planck



Poids : 2 000 kg
 Puissance électrique : 1 600 W
 Durée de vie : 21 mois

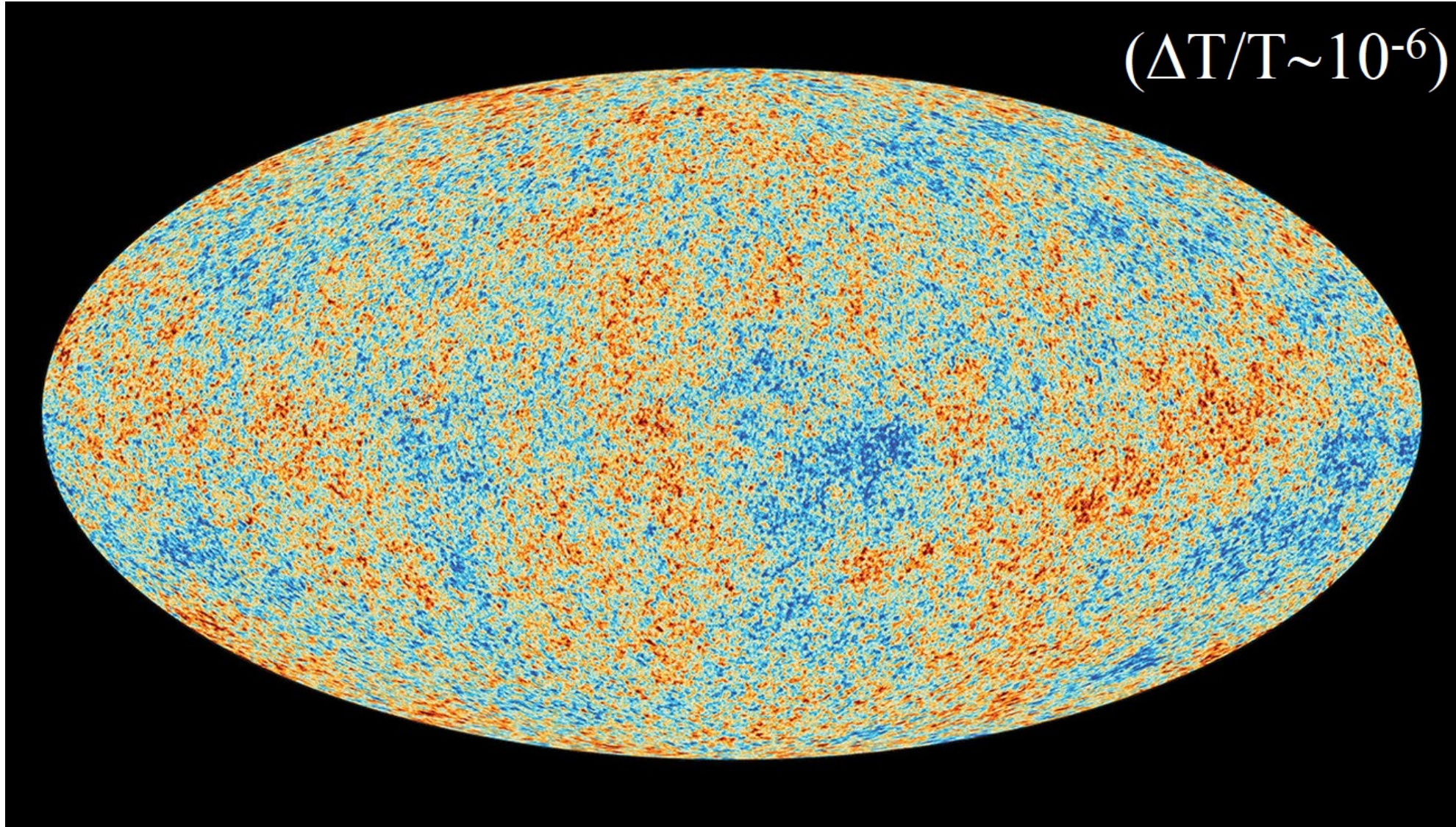
Planck HFI, c'est aussi :
 • 50 000 composants électroniques,
 • 36 000 litres d'Hélium 4,
 • 12 000 litres d'Hélium 3,
 • 11 400 documents.

On a utilisé des bolomètres refroidis à 100mK => sensibles aux variations de température

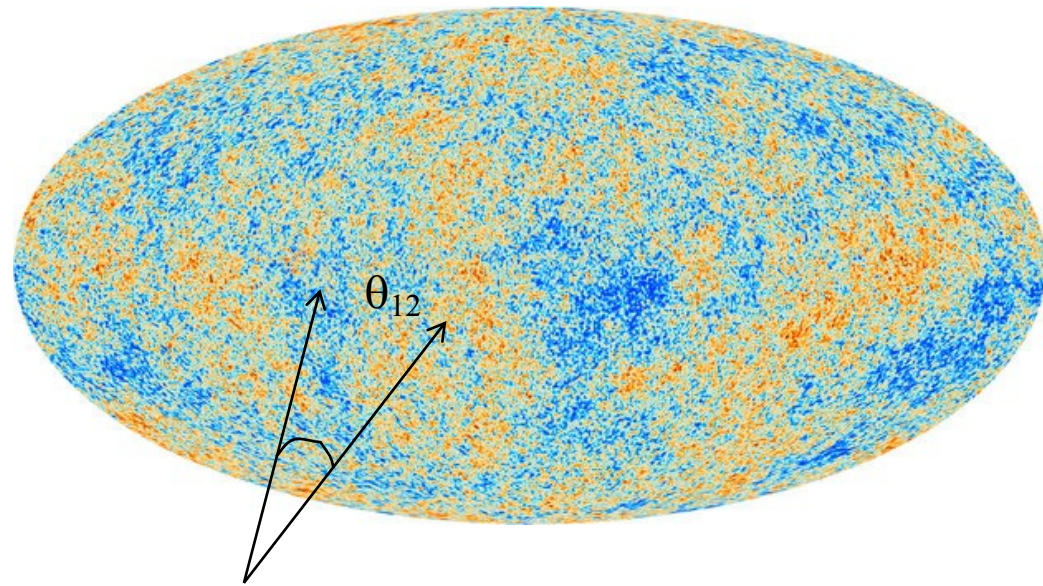


Planck a été le satellite le plus froid jamais construit par l'Homme.

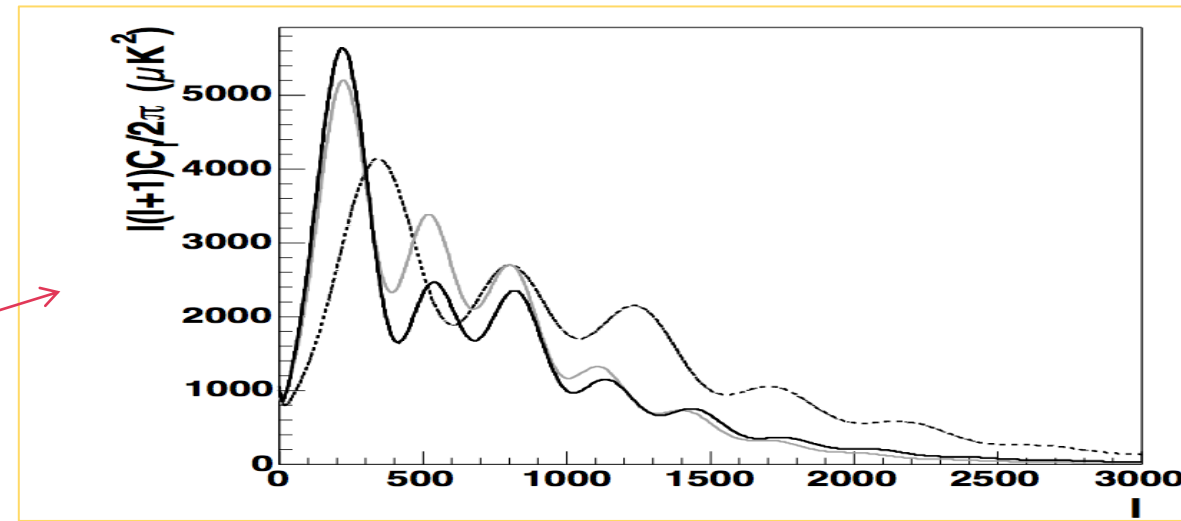
Les anisotropies de température du CMB



Comment analyse-t-on ces cartes ?

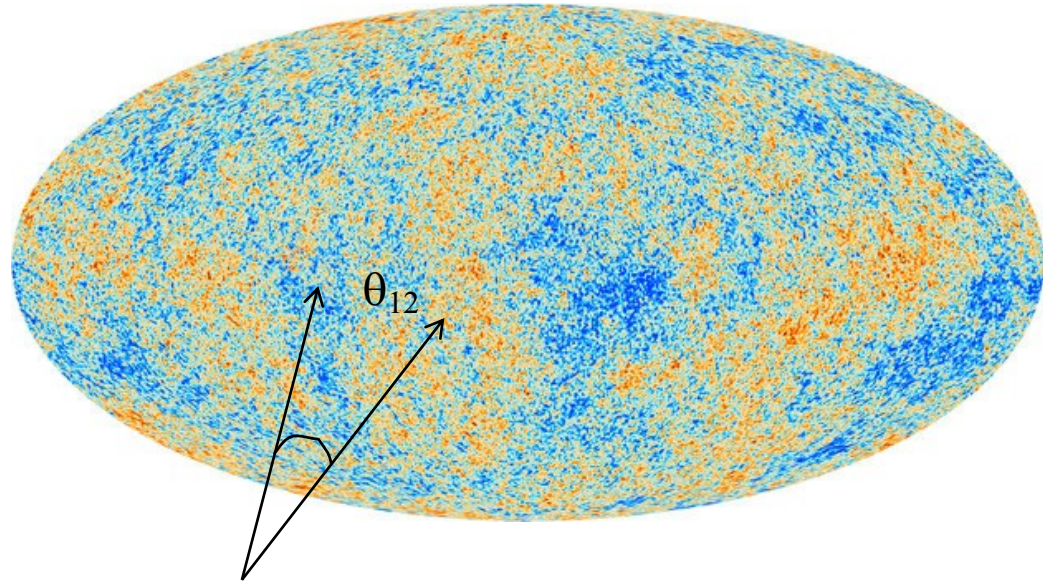


On construit la fonction de corrélation a 2 points sur la sphère



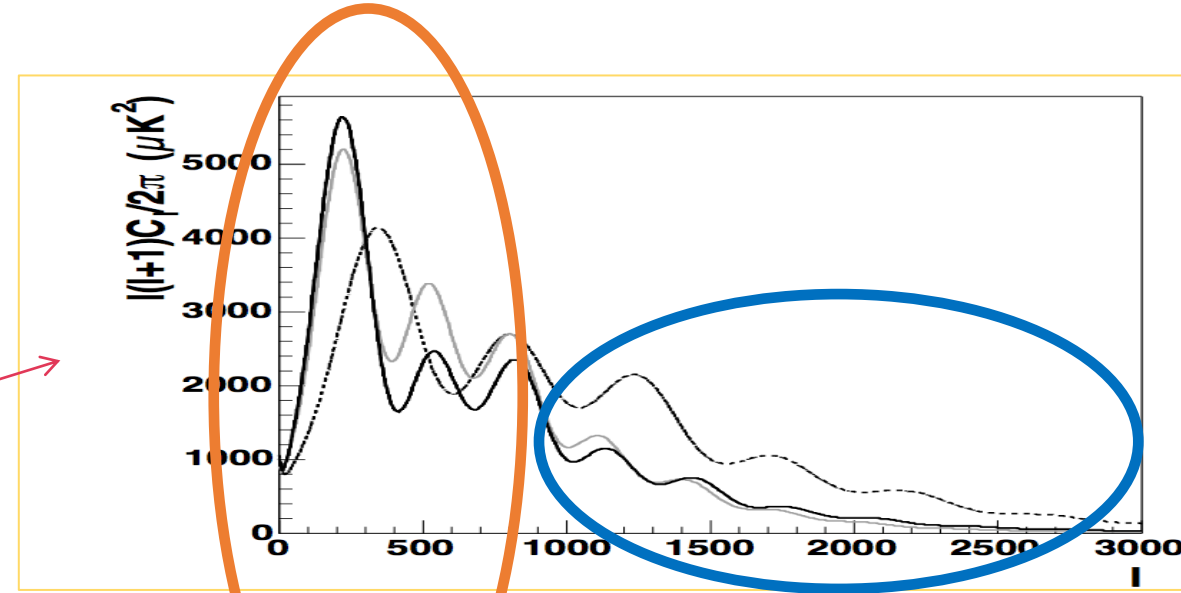
$$\langle T_1 T_2 \rangle = c(\theta_{12}) = \sum_l C_l (2l + 1) P_l(\cos \theta_{12})$$

Comment analyse-t-on ces cartes ?



On construit la fonction de corrélation à 2 points sur la sphère

$$\langle T_1 T_2 \rangle = c(\theta_{12}) = \sum_l C_l (2l + 1) P_l(\cos \theta_{12})$$

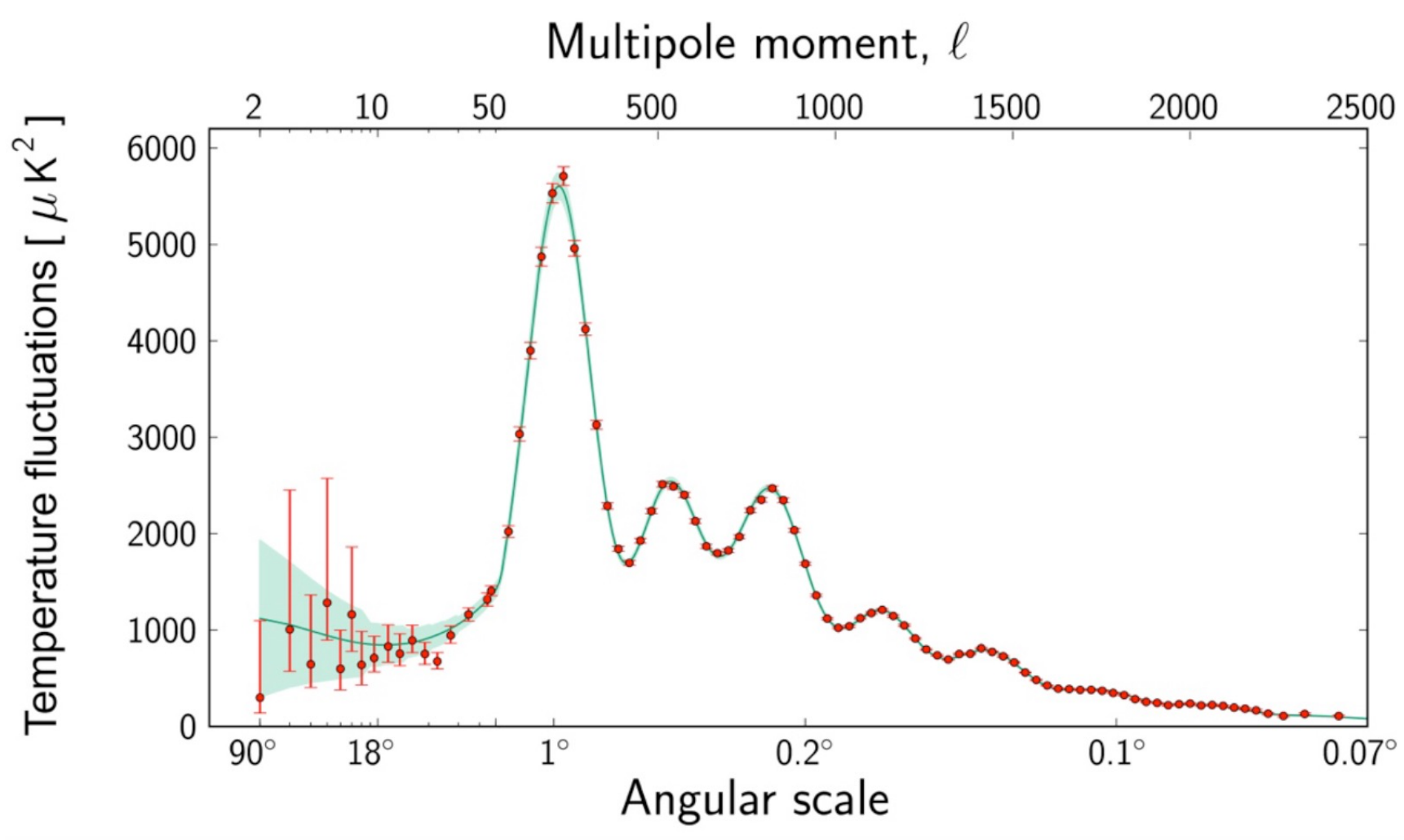


$l \approx 1/\theta_{12}$

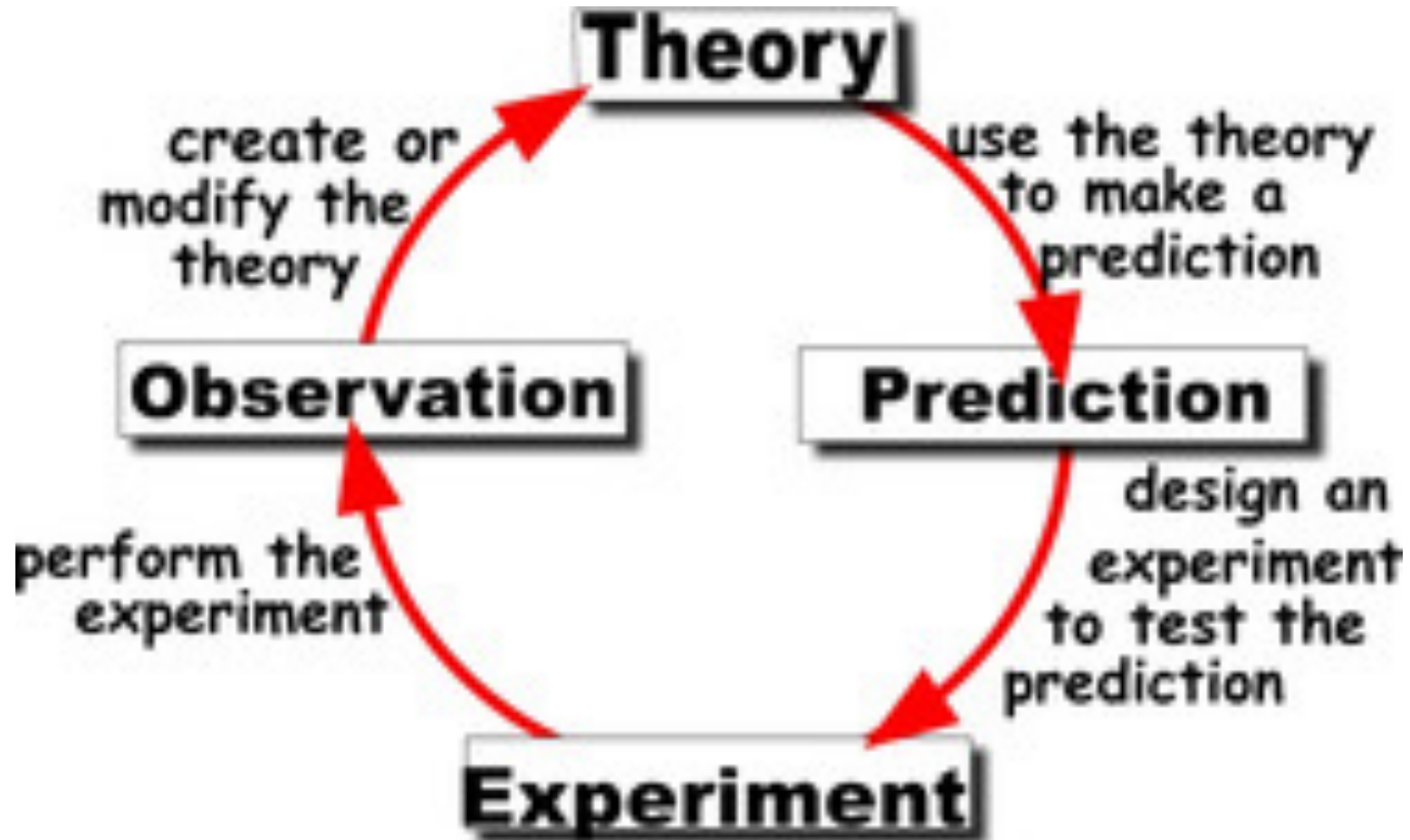
Grandes échelles angulaires

Petites échelles angulaires

Les spectres mesurés



La boucle infernale !



Les paramètres du modèle Λ_{CDM}

Les paramètres du modèle minimal

- Le paramètre de Hubble H_0
(expansion of the Universe)
- La densité de baryons $\Omega_b h^2$
- La densité de matière noire $\Omega_c h^2$
- Le moment de la reionisation z_{reio}
- Et 2 paramètres liés aux fluctuations primordiales:

$$\Rightarrow P_R(k) = A_s (k/k_0)^{n_s}$$

On peut décrire l'histoire de l'Univers
Avec seulement (!) 6 paramètres

Au delà

$\Sigma \text{mass}(\text{neutrinos})$
Nombre de 'neutrinos'
Platitude de l'Univers (..)

Les extensions

Théorie et Prédictions !

<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/#>



planck CMB Simulator



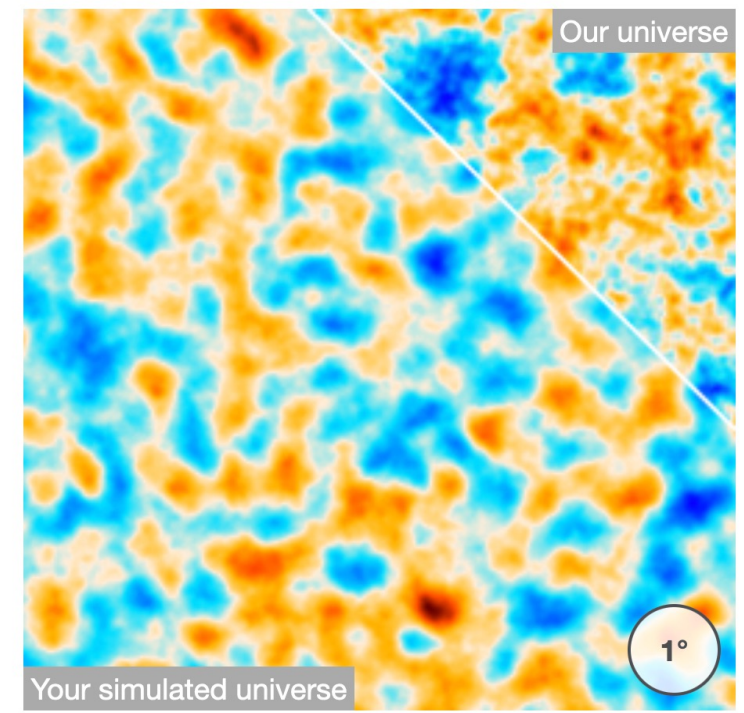
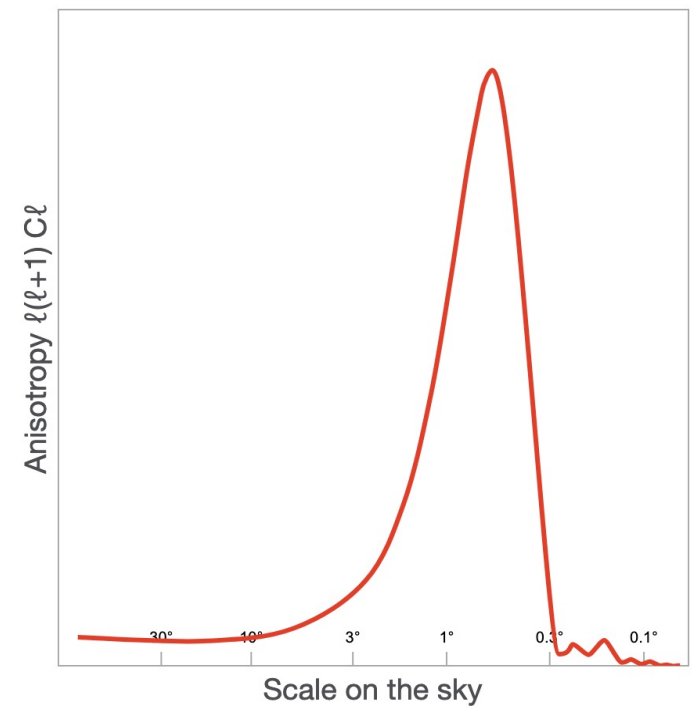
Normal Matter ($\Omega_b = 0.525$)



Dark Matter ($\Omega_c = 0.15$)



Dark Energy ($\Omega_\Lambda = 0.4$)



Normal matter only

Flatten

11.2 billion years old - too young
closed universe

Fundamental scale at $\ell = 307$ ($\sim 0.6^\circ$) - too small and too bright

Universe similarity **45%** - not like our universe

Théorie et Prédictions !

<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/#>



planck CMB Simulator



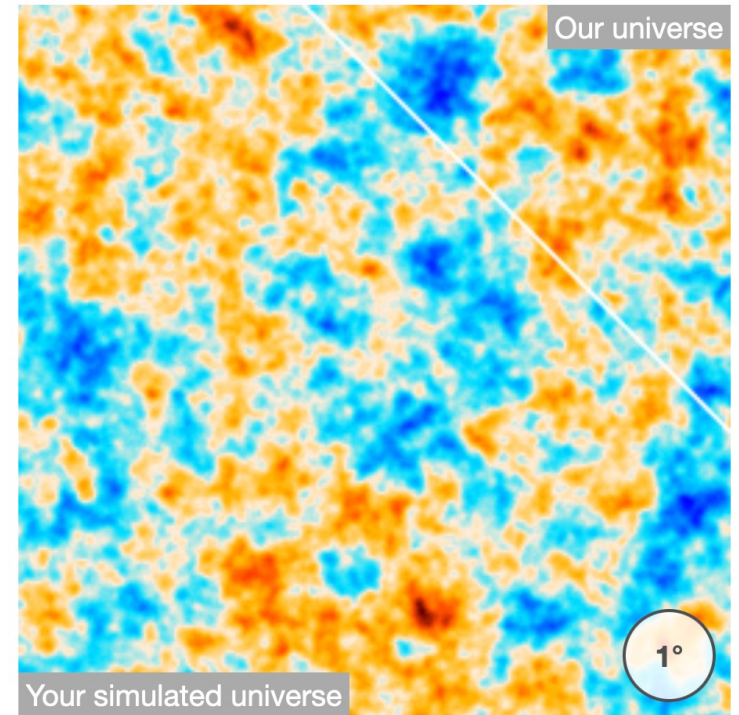
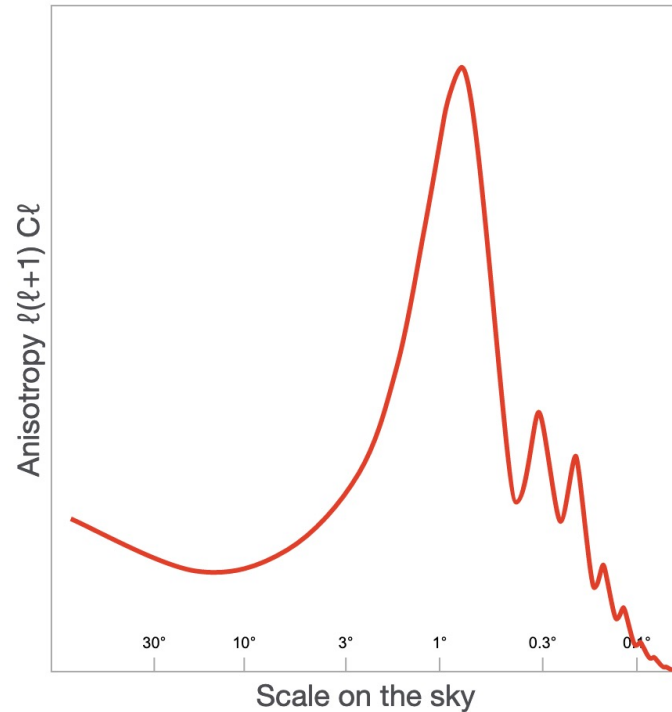
Normal Matter ($\Omega_b = 0.05$)



Dark Matter ($\Omega_c = 0.15$)



Dark Energy ($\Omega_\Lambda = 0.8$)



Normal matter only

15.7 billion years old - too old

flat universe

Fundamental scale at $\ell = 233$ ($\sim 0.8^\circ$) - too small and too bright

Universe similarity 86% - getting more like our universe

Théorie et Prédictions !

<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/#>



planck CMB Simulator

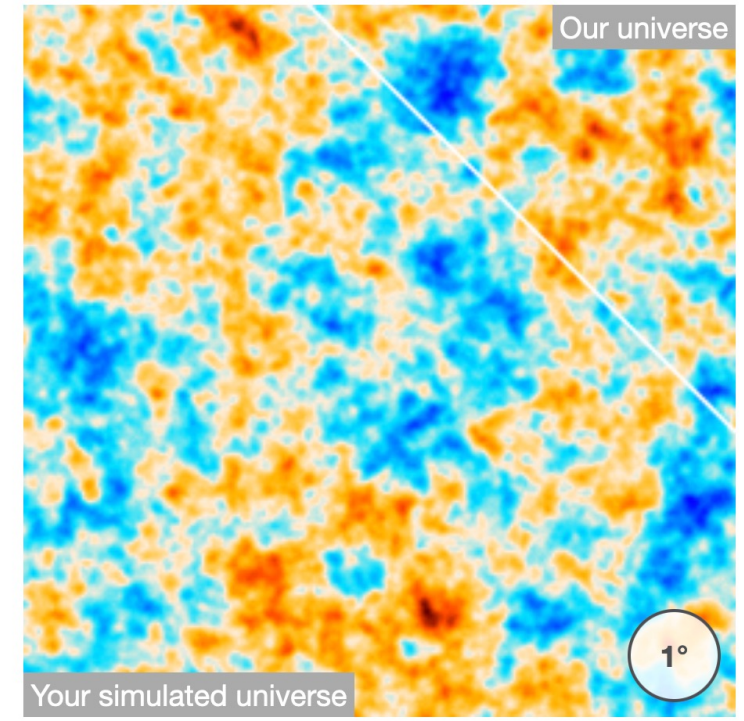
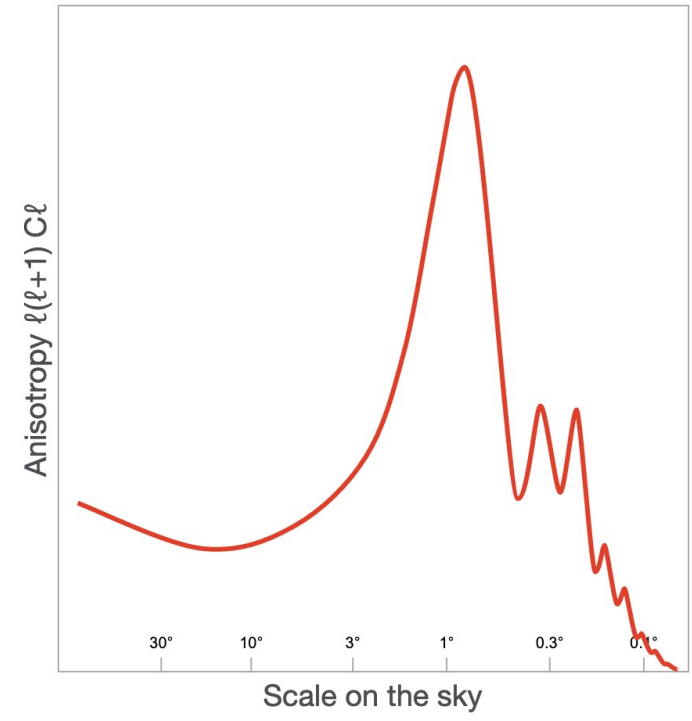


Normal Matter ($\Omega_b = 0.05$)

Dark Matter ($\Omega_c = 0.25$)

Dark Energy ($\Omega_\Lambda = 0.7$)

Normal matter only



14.1 billion years old - too old
flat universe
 Fundamental scale at $\ell = 222$ ($\sim 0.8^\circ$) - too small and too bright
 Universe similarity **98%** - very similar to our universe

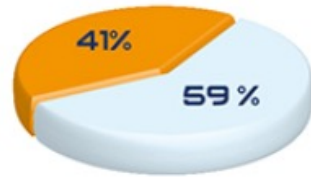
De quoi est composé l'Univers ?

AVEC PLANCK

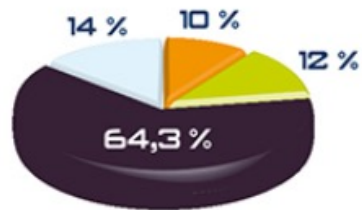
Inflation
(pendant le Big-Bang)



3 minutes après le Big-Bang

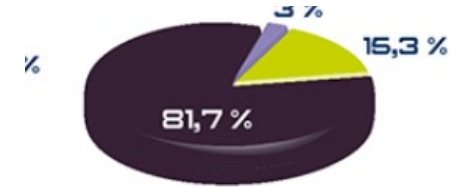


400 000 ans après le Big-Bang

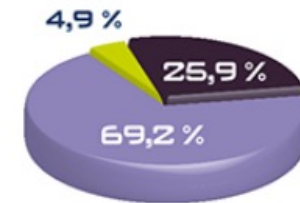


DE RAYONNEMENT
DE NEUTRINOS

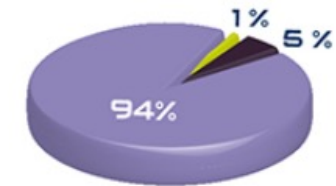
2 milliards d'années après le Big-Bang



Aujourd'hui



Dans 10 milliards d'années



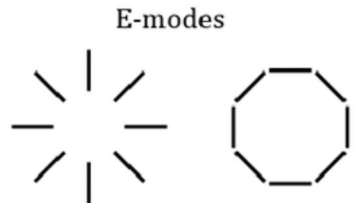
Inflaton Rayonnement

Matière sombre Energie sombre

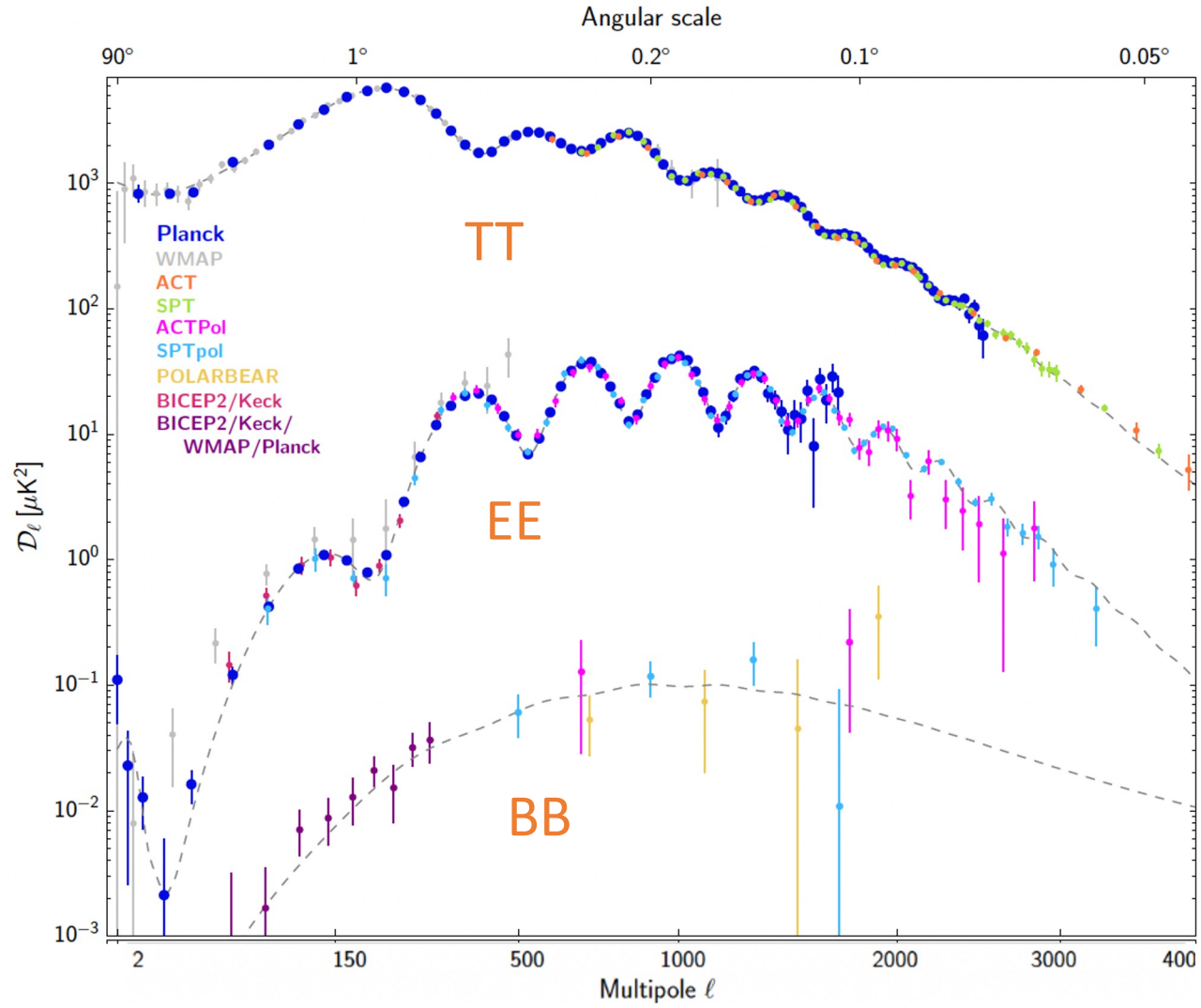
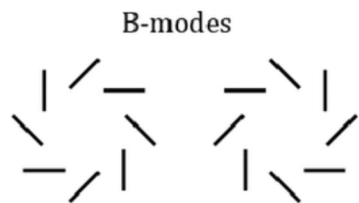
Etat de l'art : Température & Polarisation



curl-free even-parity



divergence-free odd-parity

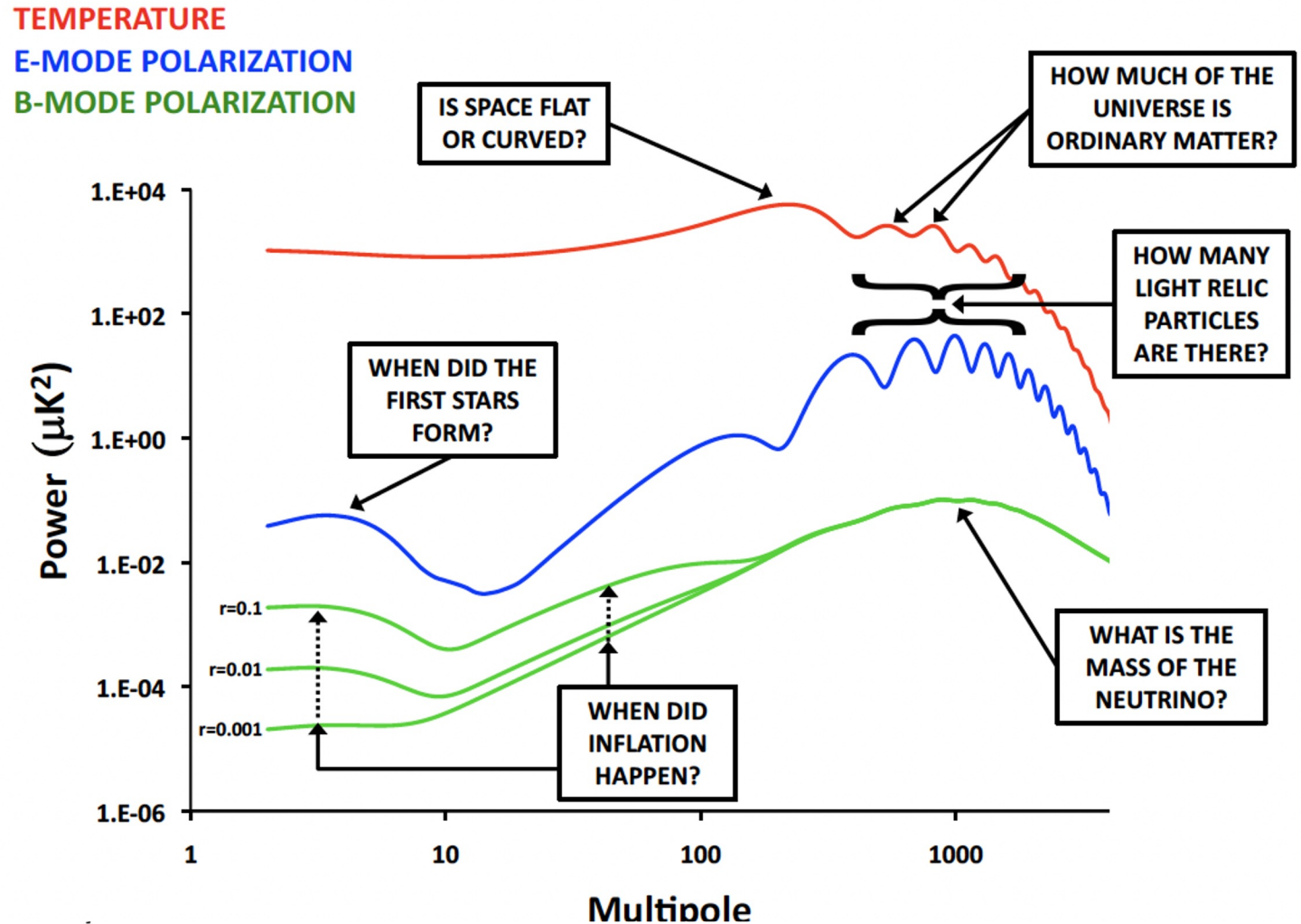


Diffusion sur les
electrons sur la surface
de derniere diffusion

Ondes
gravitationnelles
primordiales générées
par l'inflation ??



La suite ? Que veut-on mesurer ?

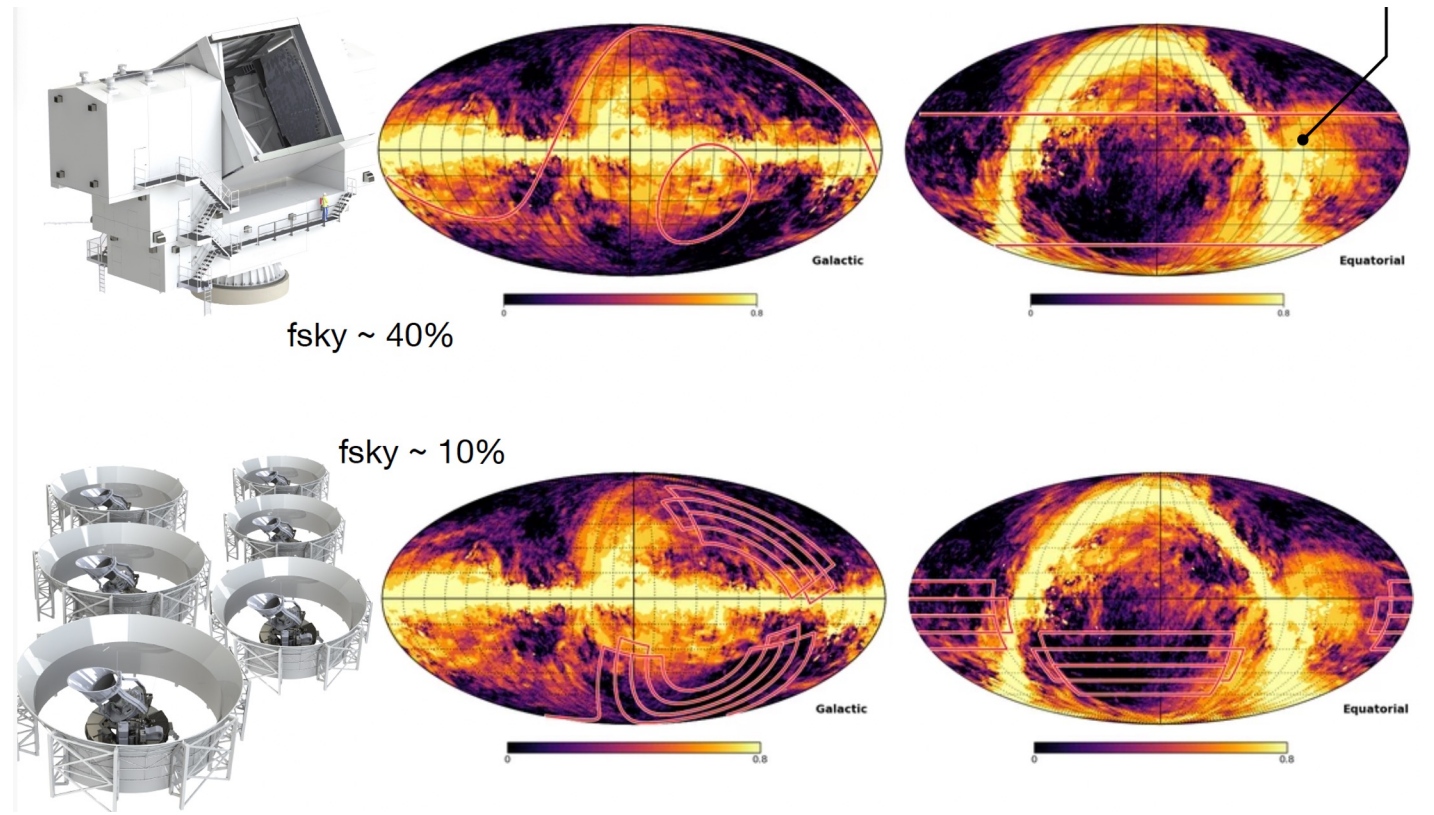
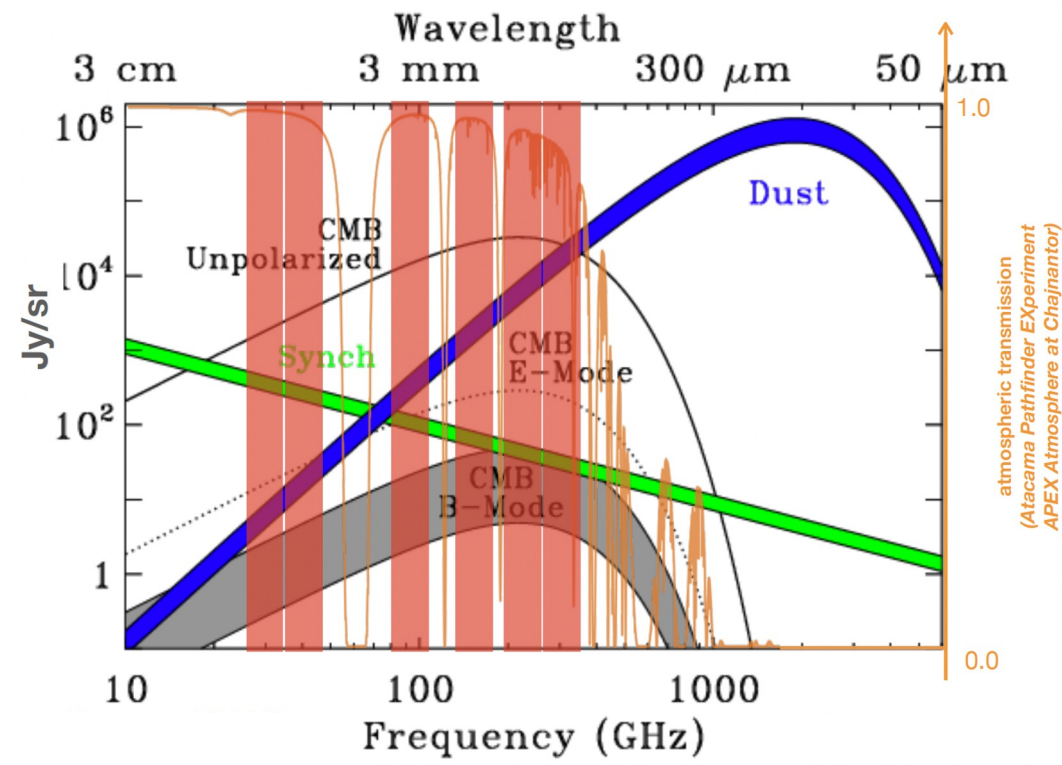


Simons Observatory



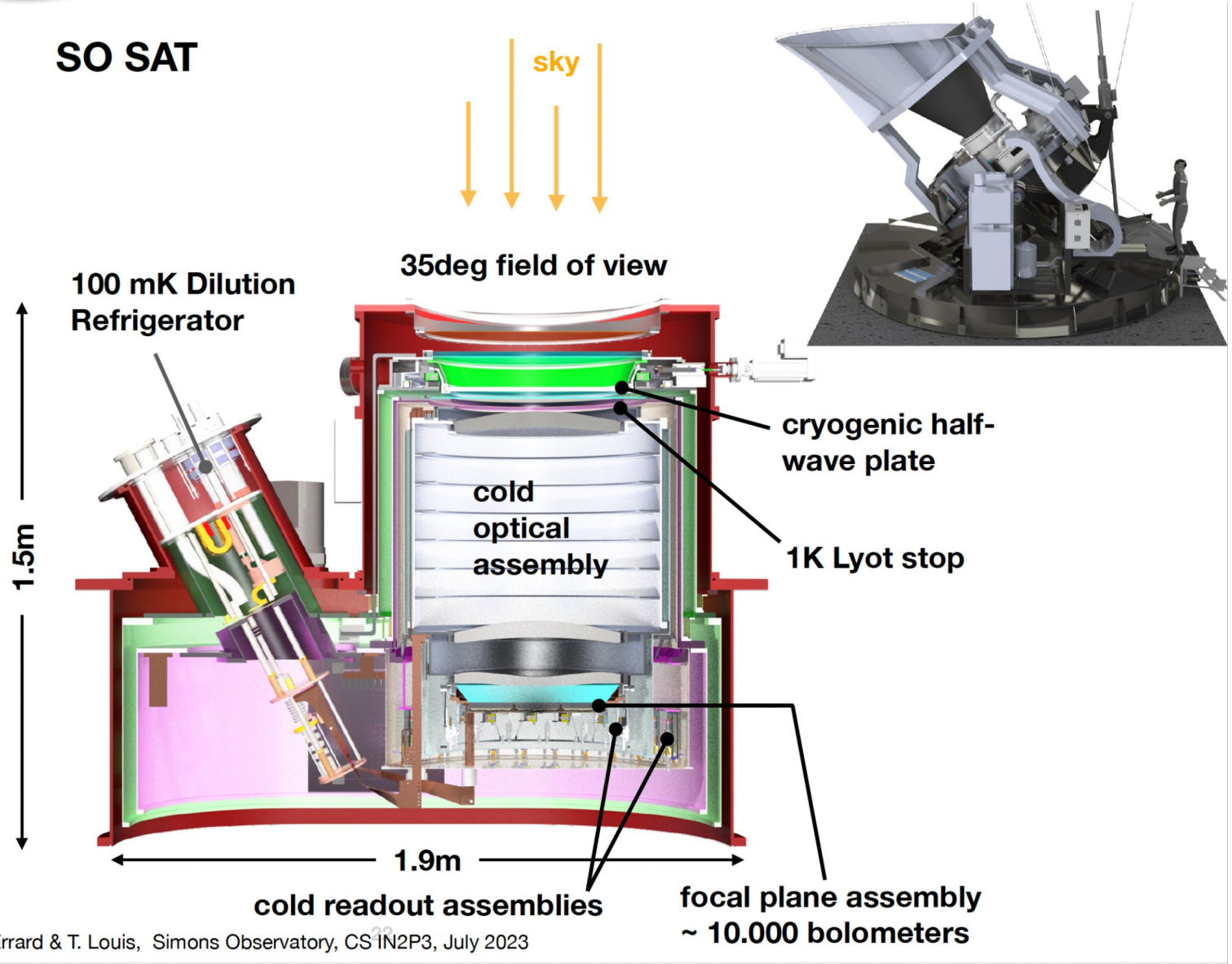
6 frequency bands
27-270 GHz

LAT & SAT



Simons Observatory: SAT

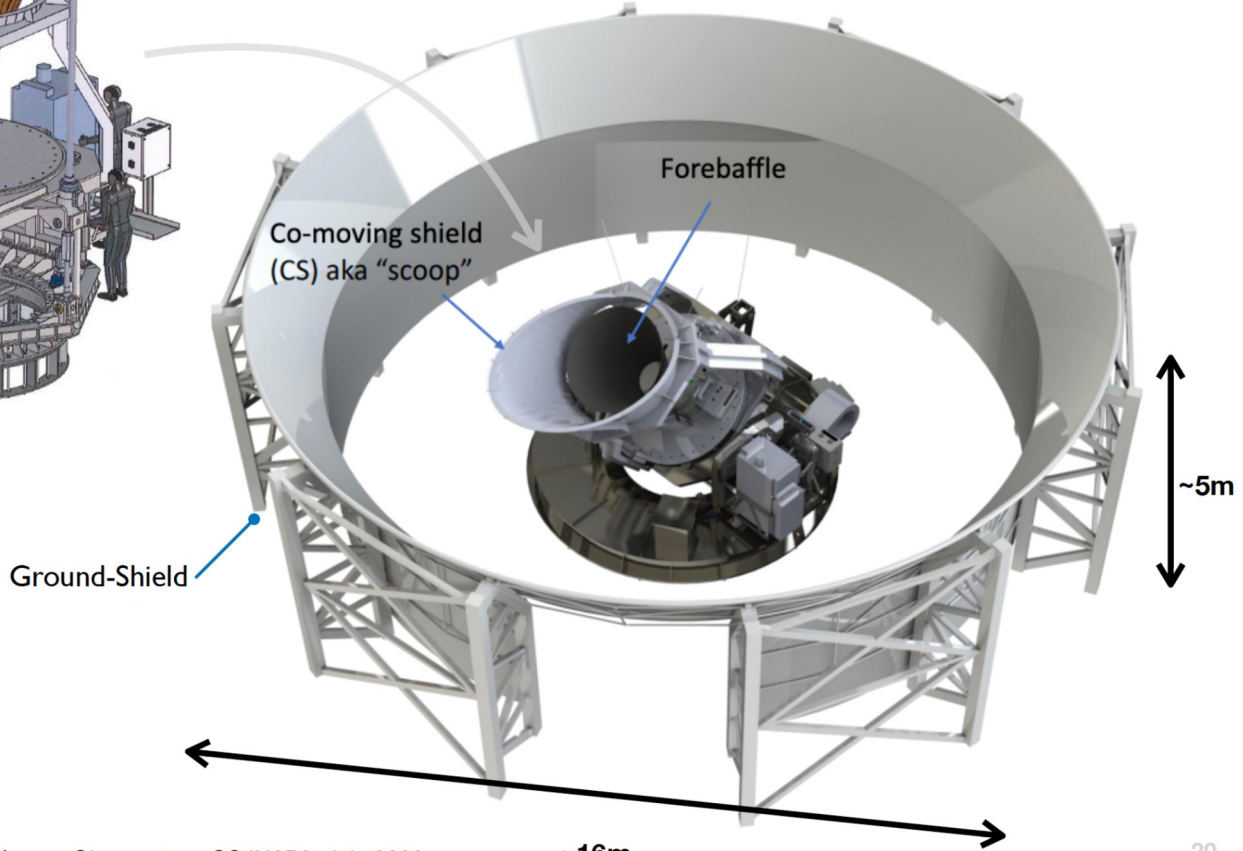
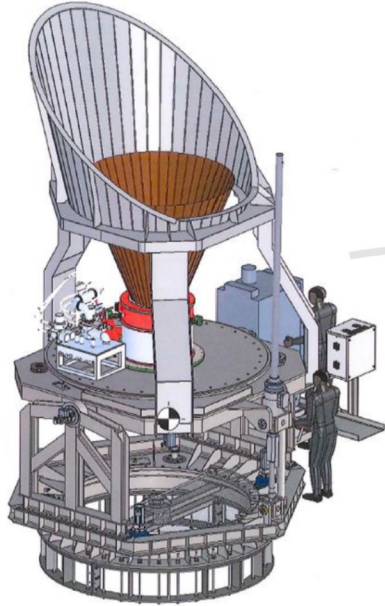
SO SAT



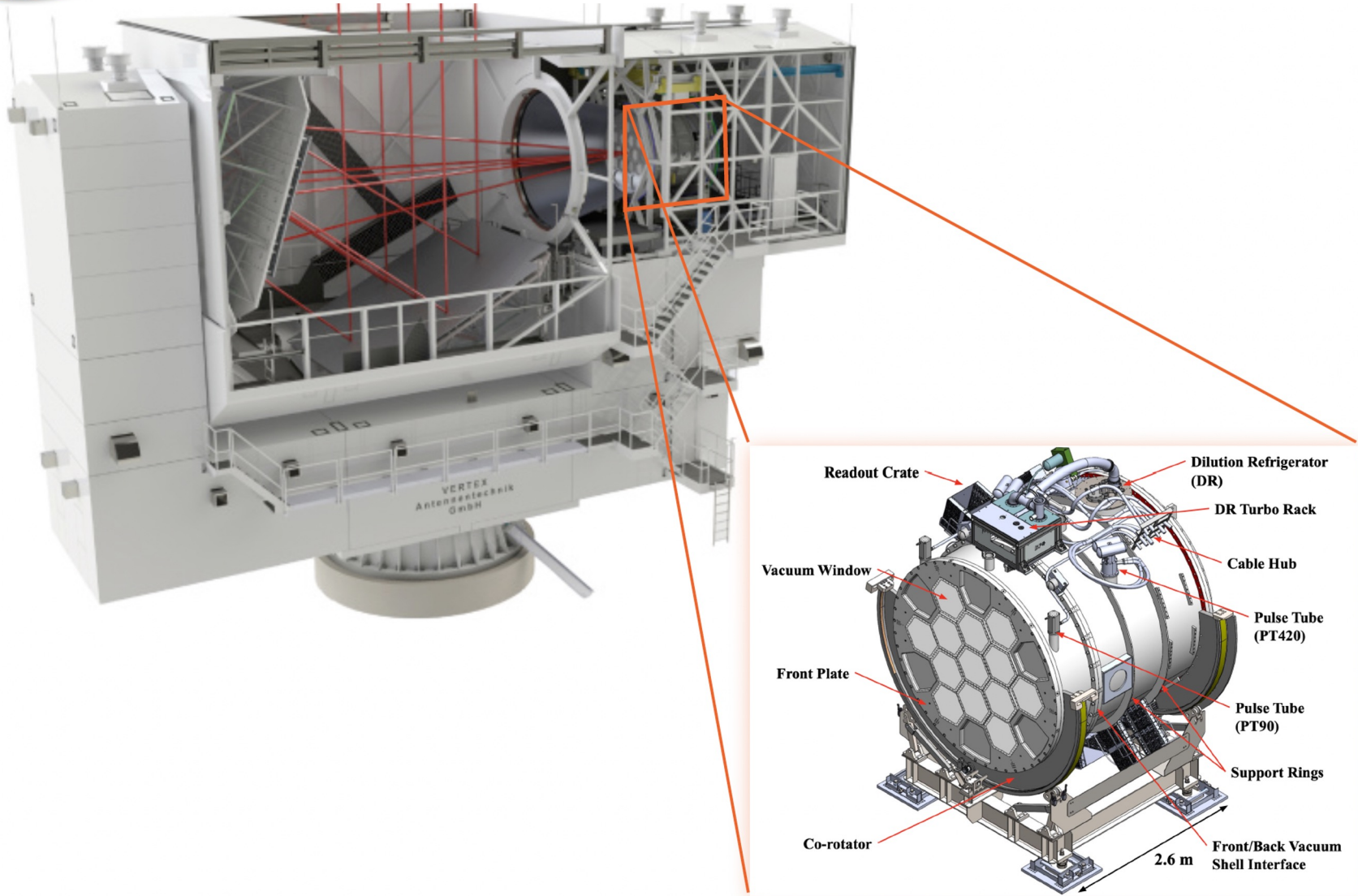
Simons Observatory: SAT - baffle et installation



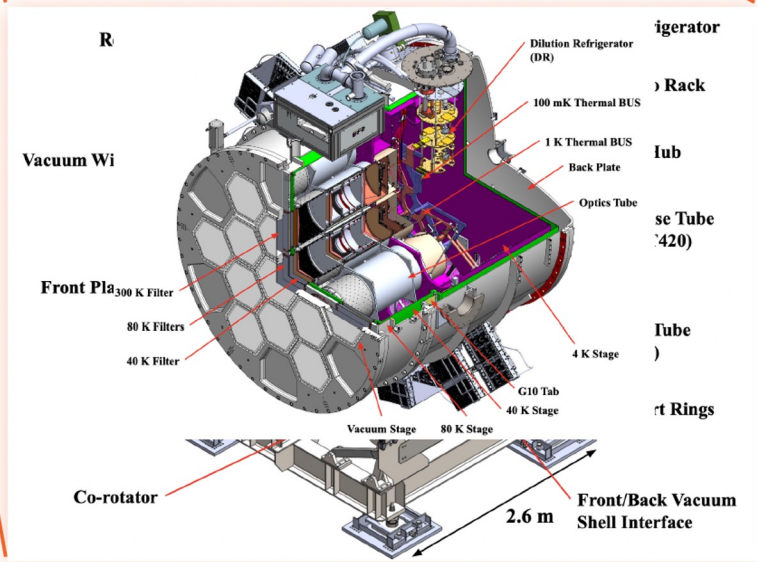
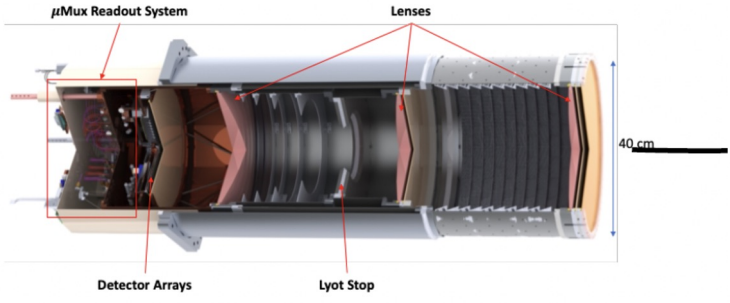
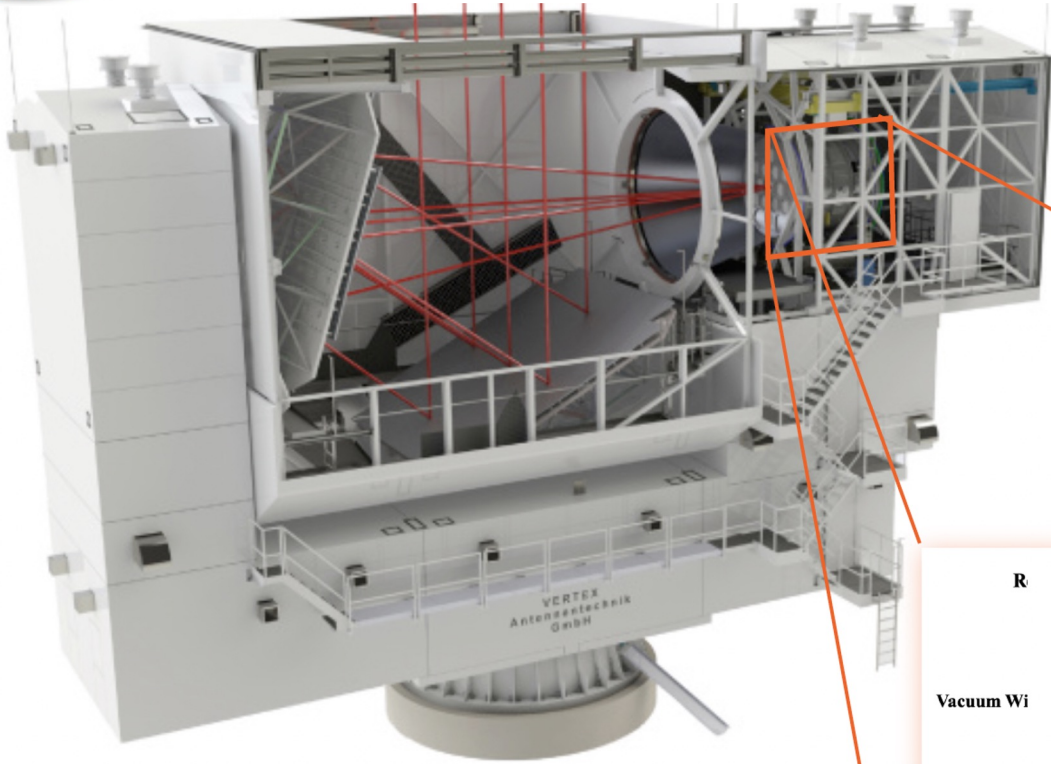
SO SAT



Simons Observatory: LAT



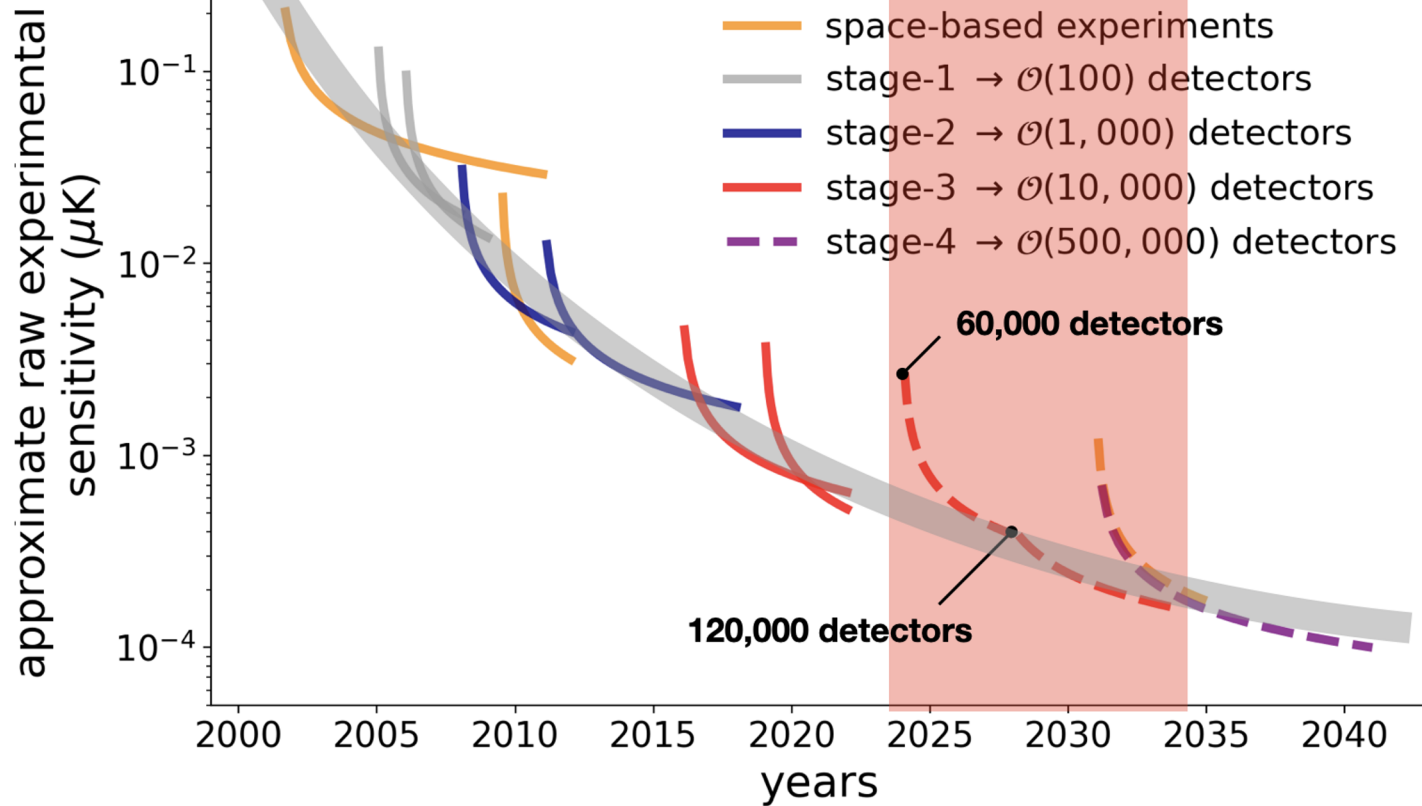
Simons Observatory: LAT



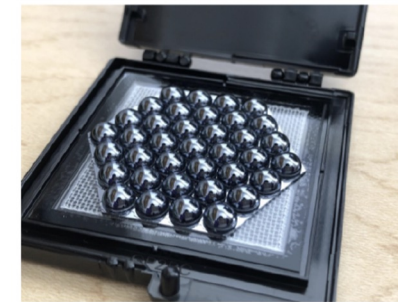
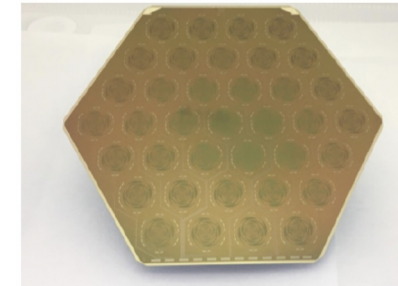
Simons Observatory: LAT



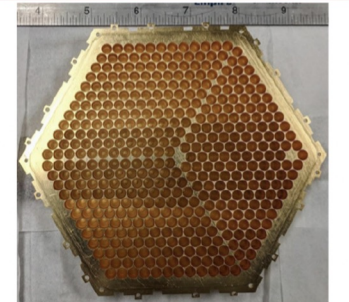
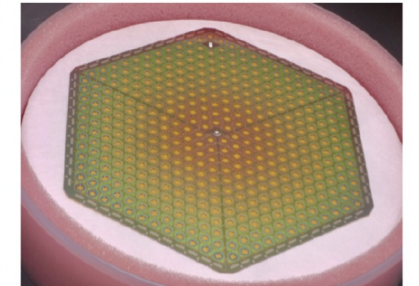
SO sensitivity



Low frequency (LF) detector arrays & lenslets

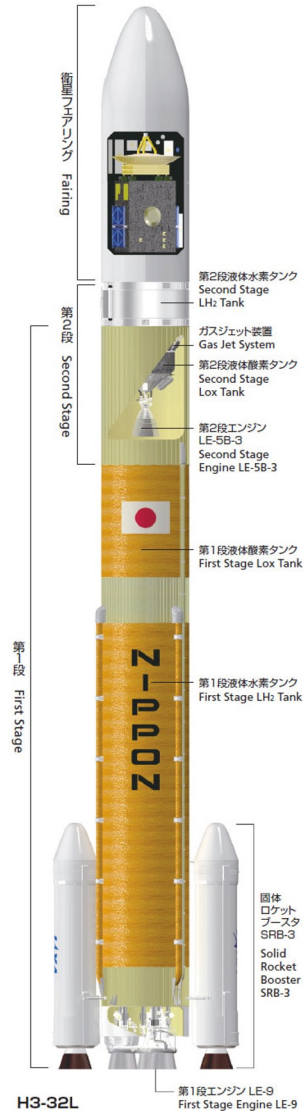
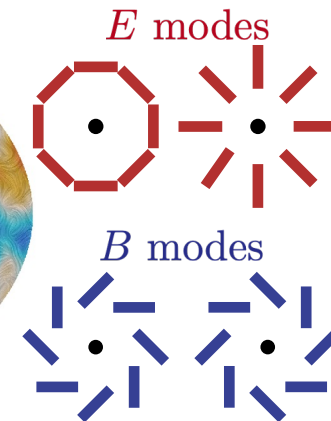
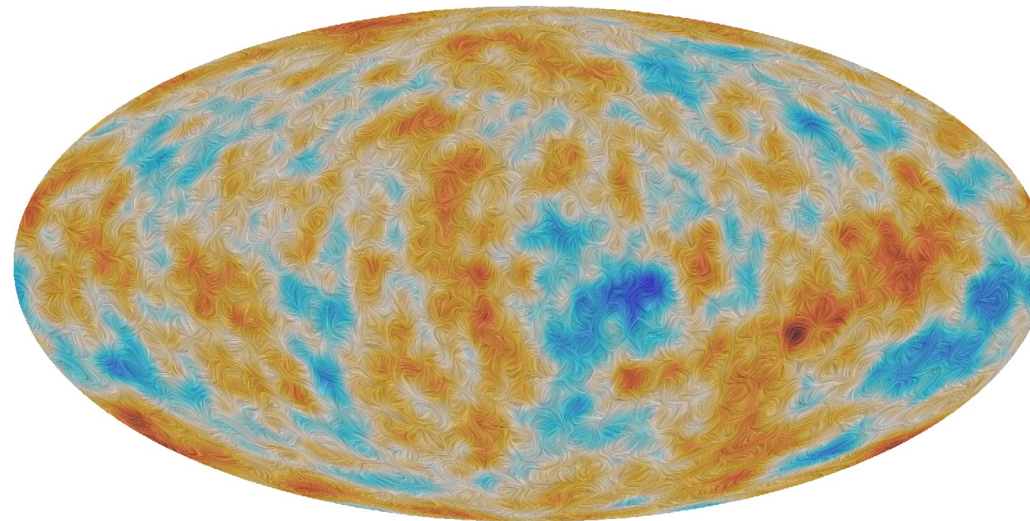
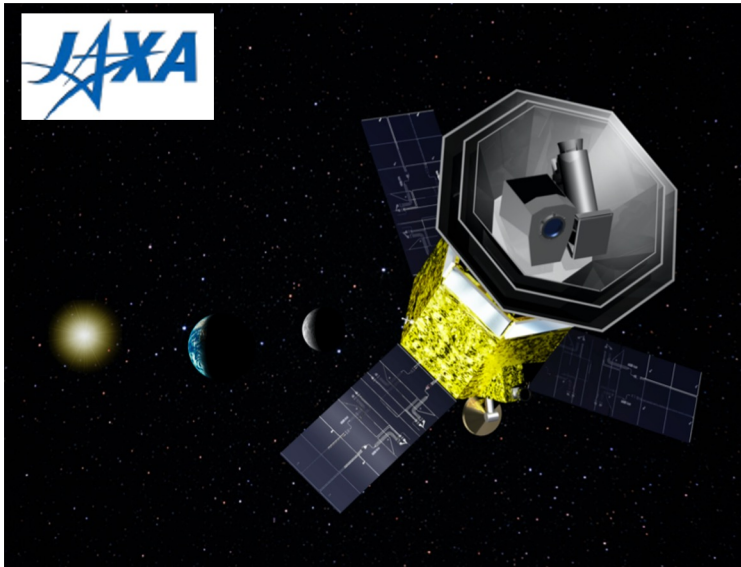


Mid frequency (MF) and ultra-high frequency (UHF) detector & horn arrays



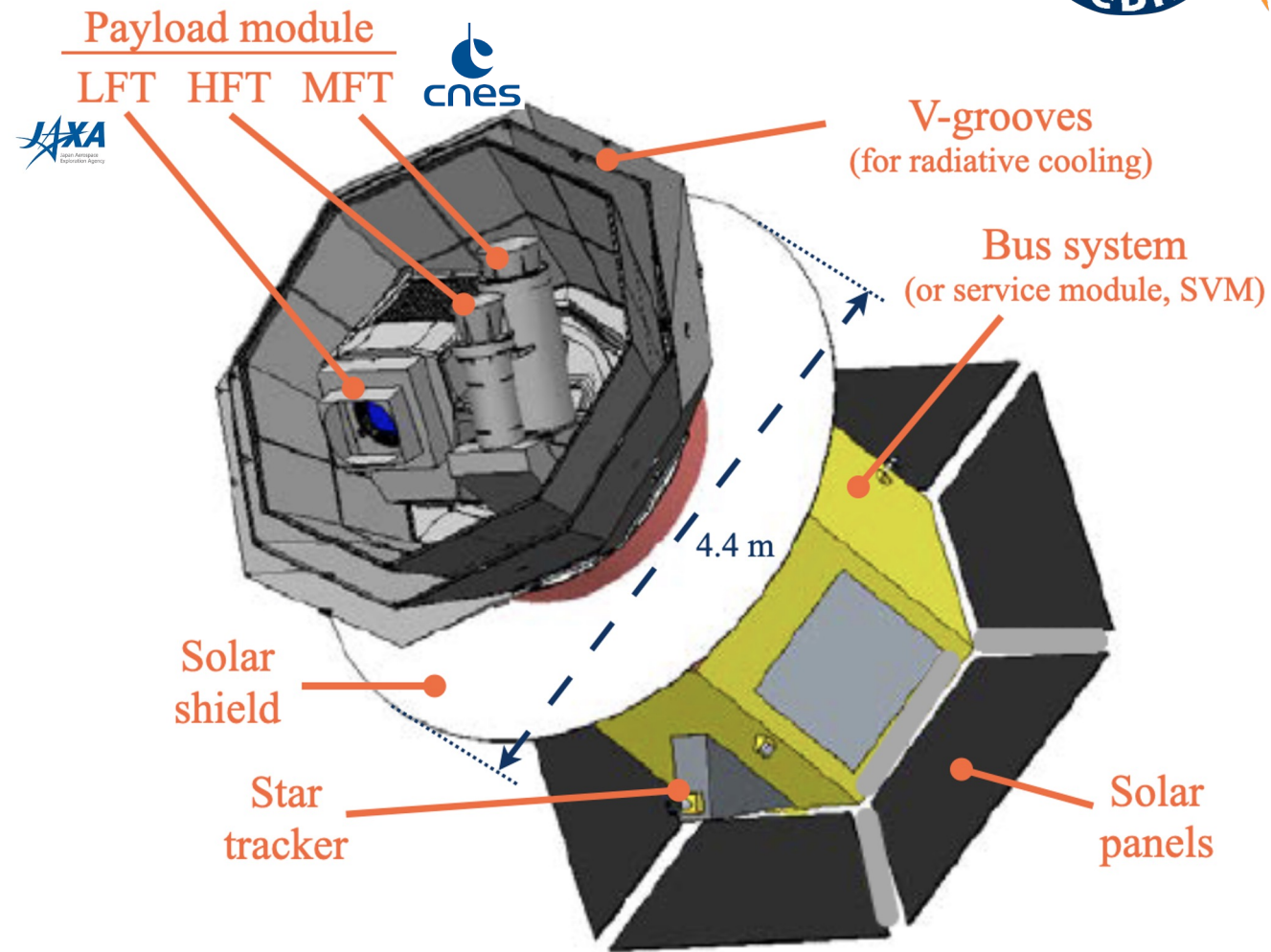
SO will use dual-polarization, dichroic TES bolometer detectors, cooled to 100 mK. The LF detector arrays build on the proven performance of POLARBEAR and the MF and UHF on ACT.

- Lite (Light) satellite for the study of B -mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection
- JAXA's L-class mission selected in May 2019
- Lancement ~**2031** avec la JAXA (H3 rocket)
- **3 ans sur tout le ciel** depuis le point L2
- Large frequency coverage (**40–402 GHz**, 15 bands) at **70–18 arcmin** angular resolution for precision measurements of the **CMB B -modes**
- Final combined sensitivity: **$2.2 \mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$** , after component separation
- final targeted sensitivity is > 100 times better than Planck-HFI in polarized intensity.

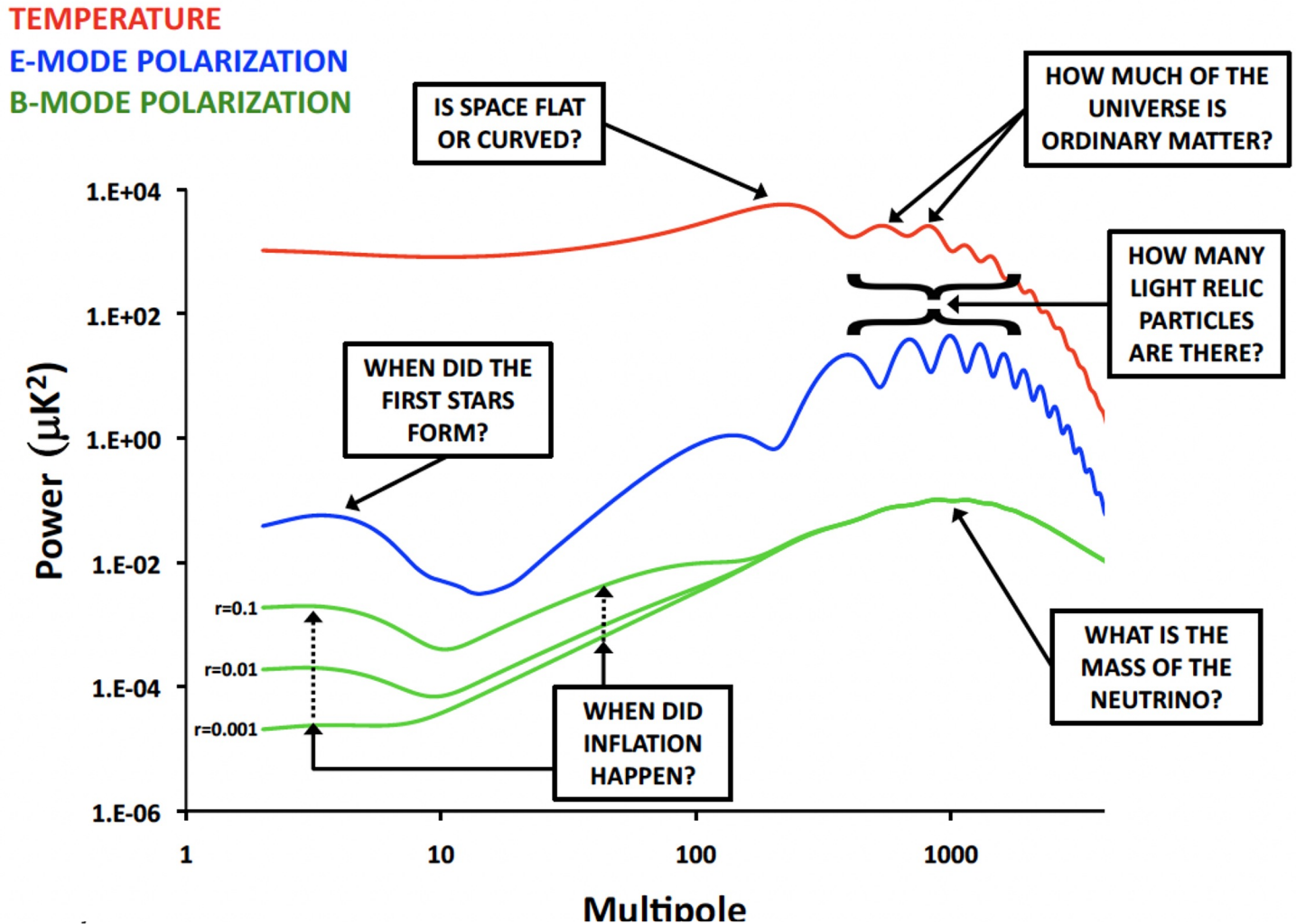


- **3 telescopes** are used to provide the **40-402 GHz** frequency coverage
 1. **LFT** (low frequency telescope)
 2. **MFT** (middle frequency telescope)
 3. **HFT** (high frequency telescope)
- Multi-chroic transition-edge sensor (TES) **bolometer arrays** cooled to **100 mK**
- Polarization modulation unit (PMU) in each telescope with **rotating half-wave plate** (HWP), for $1/f$ noise and systematics reduction
- Optics cooled to **5 K**

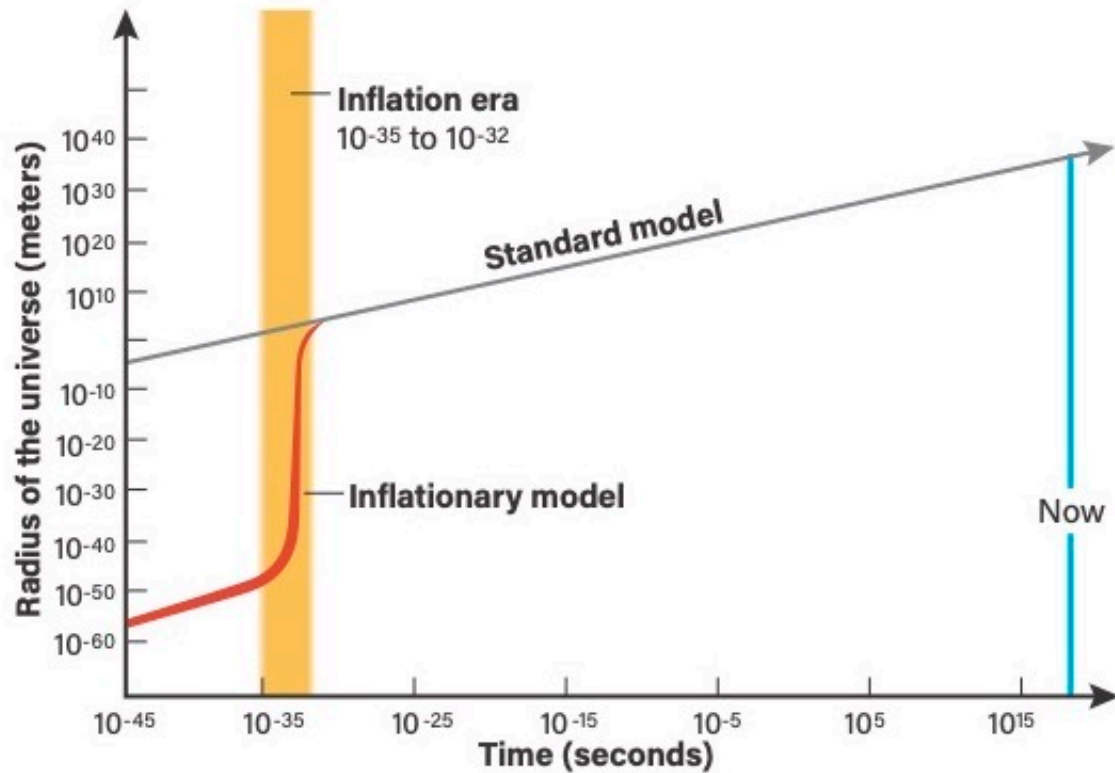
- Mass: 2.6 t
- Power: 3.0 kW
- Data: 17.9 Gb/day



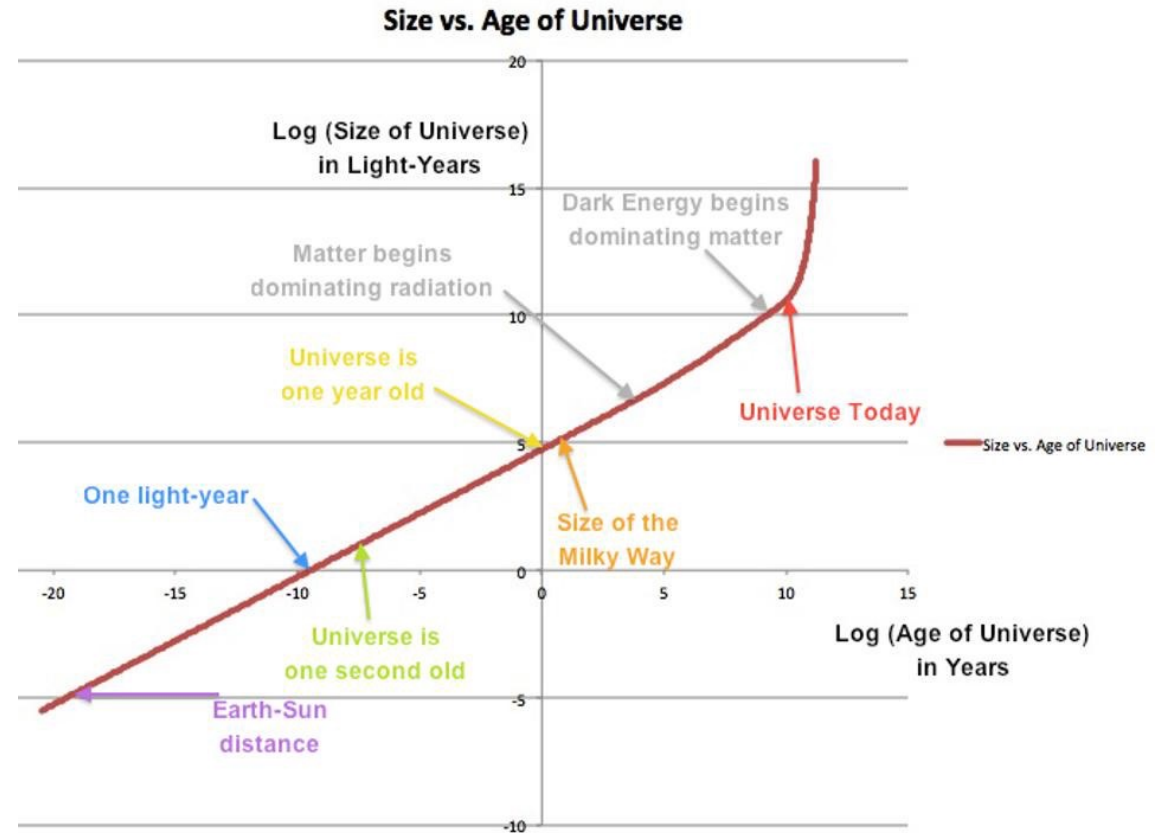
Il faudra revenir pour la suite de l'histoire !



Taille de l'Univers en fonction du temps



<https://www.astronomy.com/science/the-beginning-to-the-end-of-the-the-universe-inflating-the-cosmos/>

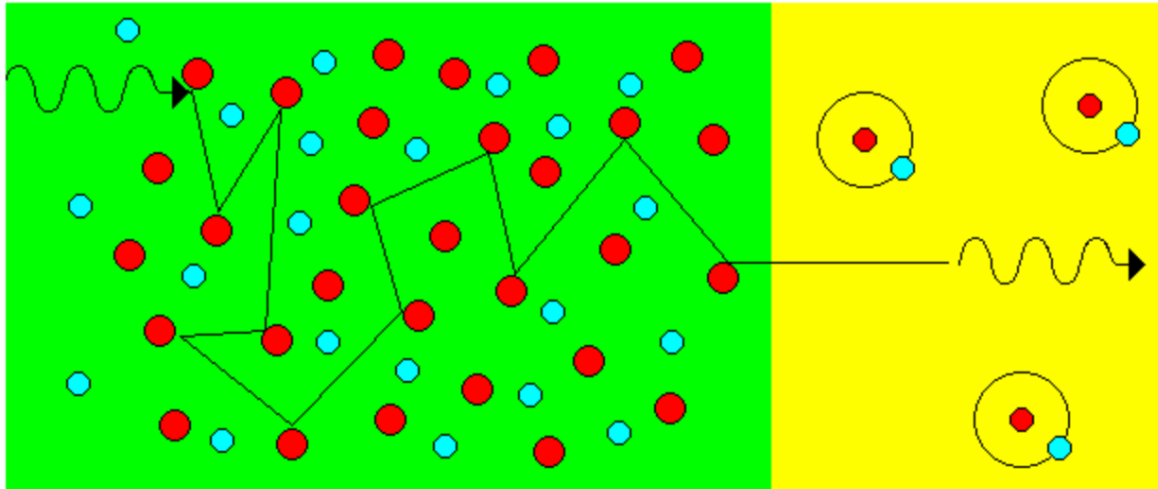


<https://bigthink.com/starts-with-a-bang/timeline-of-our-universe/>

La surface de dernière diffusion

Last Scattering Epoch

As the Universe cooled, the free electrons and protons could finally bond together to form hydrogen atoms. At the same time, the Universe went from a rich plasma to a gas of neutral hydrogen.



hydrogen plasma

atomic hydrogen

In a plasma, the mean free path of a photon is very short. In a gas of atomic hydrogen, the mean free path is very long, as long as the size of the Universe. Thus, the transition from the early plasma to atomic hydrogen is the epoch of last scattering, the point in time when the photons became free to travel without hindrance.