

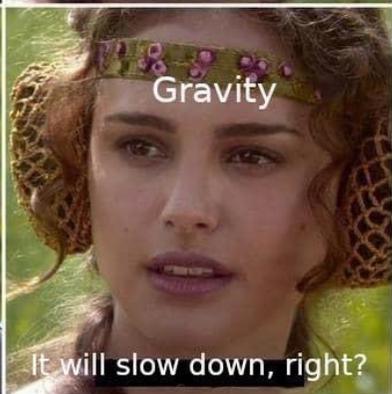
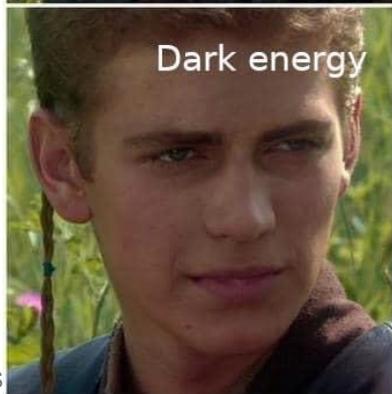
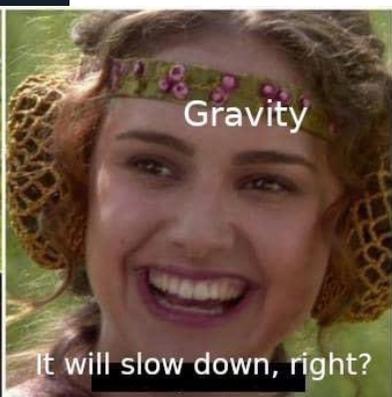


Sanjana Curtis 🐦
@sanjanacurtis

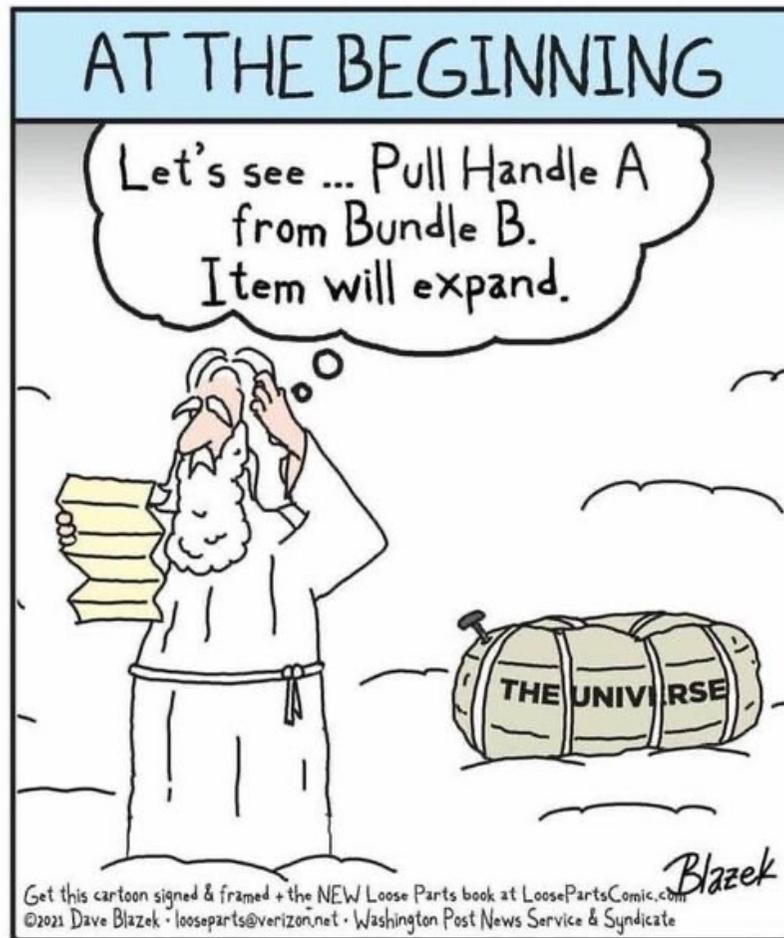
my apologies to y'all but,



14:31 · 16/01/2021 · Twitter



LOOSE PARTS




- 1 Connectez-vous sur www.wooclap.com/ASTRO131
- 2 Vous pouvez participer

- 1 Pas encore connecté ? Envoyez @ASTRO131 au 06 44 60 96 62
- 2 Vous pouvez participer



1 Connectez-vous sur
www.wooclap.com/ASTRO131

2 Vous pouvez participer



1 Pas encore connecté ? Envoyez
@ASTRO131 au 06 44 60 96 62

2 Vous pouvez participer

+ Phys131 sur ecampus <https://ecampus.paris-saclay.fr/course/view.php?id=115429>

Pr Hervé Dole

 @herve_dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay
Université Paris-Saclay & CNRS
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

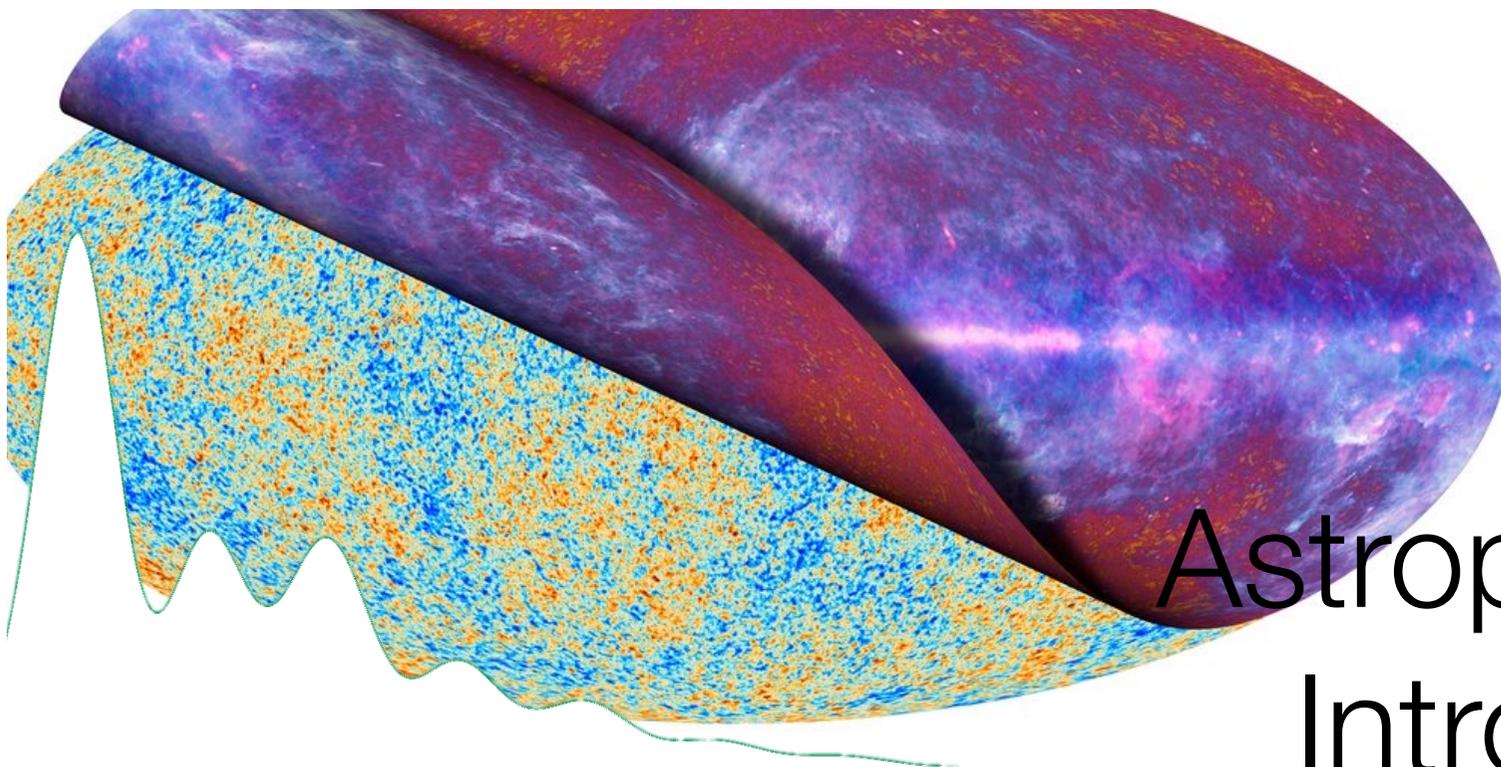
2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131

université
PARIS-SACLAY



31
ue:
on,
ue
gie



Phys131 Astrophysique: Introduction, démarche scientifique & un peu de cosmologie

Pr Hervé Dole

 @herve_dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay
Université Paris-Saclay & CNRS
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131



Initiation à l'astrophysique

Phys131

E. Habart, H. Dole, E. Ducrot

emilie.habart@universite-paris-saclay.fr

herve.dole@universite-paris-saclay.fr

elsa.ducrot@cea.fr

Partie 1: Hervé Dole

Partie 2: Emilie Habart

Partie 3: Elsa Ducrot

Dates importantes pour Phys131

- 26 sept: contrôle continu 1h dans cet amphi
- 24 oct : partiel
- [23 nov et 7 dec: peut-être visite de l'IAS; à confirmer]
- 19 dec : examen

- Documents (diapos, énoncés de TD) et ressources (vidéos, podcasts..) disponibles sur ecampus: chercher astrophysique ou Phys131 ou le lien:

<https://ecampus.paris-saclay.fr/course/view.php?id=155401>

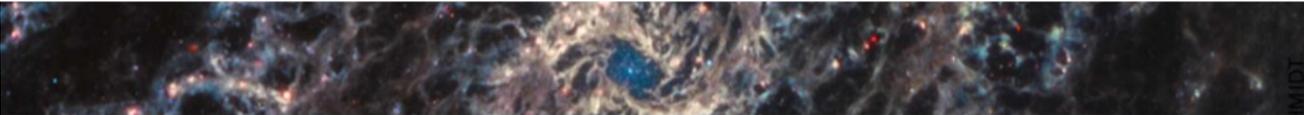
- Emails: ajouter « Phys131 » dans l'objet

Livres et vidéos liées à ce cours

- Cf syllabus distribué

Université Paris-Saclay – Phys131 – Initiation à l'astrophysique – p 1

Phys131 Initiation à Astrophysique – 2024



Hervé Dole (IAS) – herve.dole@universite-paris-saclay.fr
Émilie Habart (IAS) – emilie.habart@universite-paris-saclay.fr
Elsa Ducrot (CEA) – elsa.ducrot@cea.fr

(Si vous envoyez un email aux enseignants : merci de mettre au moins "Phys131" dans l'objet du message)

A. Généralités

A1. Le programme couvert par les trois enseignants-chercheurs concerne :

- La cosmologie et les galaxies
- Le milieu interstellaire de notre Galaxie, la formation des étoiles et des systèmes protoplanétaires
- Les exoplanètes et l'évolution stellaire

Le jeudi : 13:30 – 15:30 en 333-H1.

A2. MCC : 1 interro en cours (30%), 1 partiel (30%), 1 examen (40%)
(+ des quiz auxquels répondre avant certaines séances pour des points bonus).
Dates : CC le 26/09 en amph. Partiel le 24/10. Examen le 19/12.

A3. Page eCampus du cours Phys131: QR code à droite ou lien :
<https://ecampus.paris-saclay.fr/course/view.php?id=155401> inscrivez-vous ! - - ->



B. Livres facultatifs recommandés

- Sciences de l'Univers – Du Big Bang aux exoplanètes de Jean-Yves Daniel et Alain Riazuelo, De Boeck Supérieur, 2020
- Le milieu interstellaire, livre de James Lequeux, EDP Sciences, 2002
- A very short introduction to Astrobiology de David Catling, Oxford
- Le côté obscur de l'Univers de Hervé Dole, Dunod, 2017 ou 2020
- Les couleurs de l'Univers de Yaël Nazé, Belin
- La matière noire, clé de l'Univers ? de Françoise Combes, Vuibert

Prochains évènements en lien avec astroph.

<https://openagenda.com/fr/universite-paris-saclay>

CYCLE DE CONFÉRENCES D'ALUMNI

Nos belles histoires

**MARDI
8
OCTOBRE
2024
18h30**

**Théâtre Rousseau,
bâtiment Bouygues
de CentraleSupélec**
9 rue Joliot-Curie
91190 Gif-sur-Yvette



Caroline Freissinet
Docteure en chimie analytique, Caroline Freissinet est chercheuse CNRS au Laboratoire atmosphères et observations spatiales (LATMOS) et spécialisée en astrochimie et sciences planétaires. Elle recherche les origines et la complexité des molécules chimiques dans le système solaire, ainsi que des signatures chimiques de vie extraterrestre. Pour cela, elle explore robotiquement les corps célestes et leurs environnements inédits, ainsi que leurs analogues sur Terre.



Cyprien Verseux
Docteur en biologie moléculaire et cellulaire, Cyprien Verseux dirige le Laboratoire de microbiologie spatiale appliquée à l'exploration scientifique avec isolement en conditions extrêmes. Il développe avec son équipe des systèmes biologiques capables de produire les ressources nécessaires à la survie des astronautes, une fois sur Mars.

« **Astrobiologistes et explorateurs de mondes (extra)terrestres** »



8 octobre 18:30
CentraleSupélec salle Rousseau



Dimanche 20 octobre 2024 soir
au centre d'Orsay

- -> Twitter / fb / insta: la Diagonale Paris-Saclay et de l'Université Paris-Saclay et Faculté des sciences d'Orsay
- Association ALCOR avec telescope au hbar, soirées, conférences etc

Prochains évènements en lien avec astroph.

site-paris-saclay

CYCLE DE CONFÉRENCES D'ALUMNI

Nos belles histoires



Caroline Freissinet
Docteure en chimie analytique, Caroline Freissinet est chercheuse CNRS au Laboratoire atmosphères et observations spatiales (LATMOS) et spécialisée en astrochimie et sciences planétaires. Elle recherche les origines et la complexité des molécules chimiques dans le système solaire, ainsi que des signatures chimiques de vie extraterrestre. Pour cela, elle explore robotiquement les corps célestes et leurs environnements inédits, ainsi que leurs analogues sur Terre.

« **Astrobiologistes et explorateurs de mondes (extra)terrestres** »

MARDI
8 OCTOBRE 2024
18h30



université PARIS-SACLAY

8 octobre 19h
CentraleSupelec salle 110

Rappel : les obs sont ouvertes à tous.tes !
On vous attend nombreux !

Translate post



OBSERVATION
Vendredi 13 Septembre - 21h
bât. 625 hbar

ALCOR
Association Lycéens de l'Université Paris-Saclay



université PARIS-SACLAY



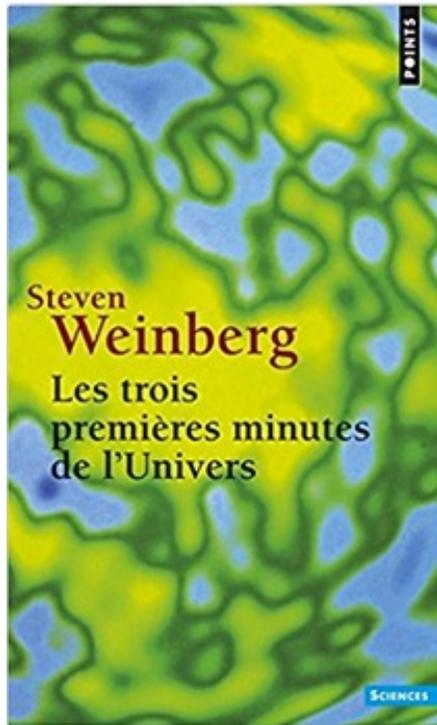
LE JOUR de la NUIT

le 20 octobre 2024 soir
au centre d'Orsay

Twitter / fb / insta: la Diagonale Paris-Saclay et de l'Université Paris-Saclay et Faculté des sciences d'Orsay

Observation ALCOR avec telescope au hbar, soirées, conférences etc

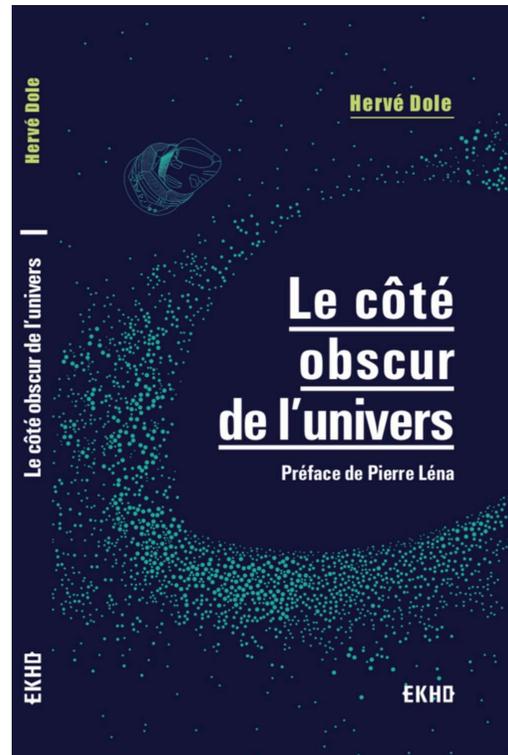
Conseils de lecture plus approfondie



Les trois premières
minutes de l'univers

(les 5 premiers chapitres)

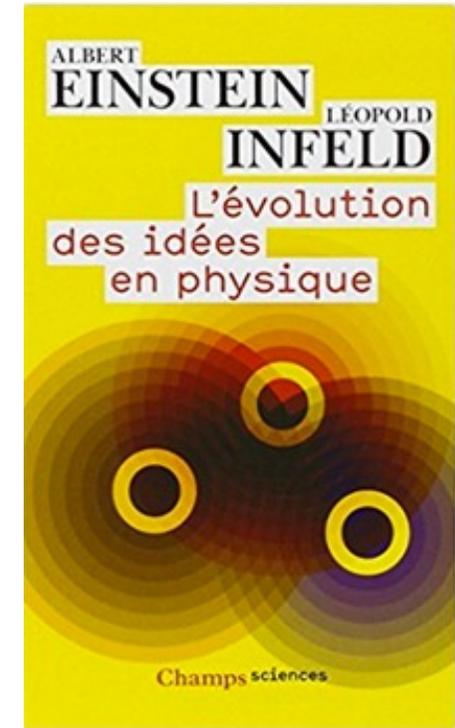
Steven Weinberg
1977-1990, Seuil



Le côté obscur de l'univers

(chapitres 2, 3 et 4 surtout,
et le reste si vous avez
envie)

Hervé Dole
2020 Dunod
Disponible à la BU

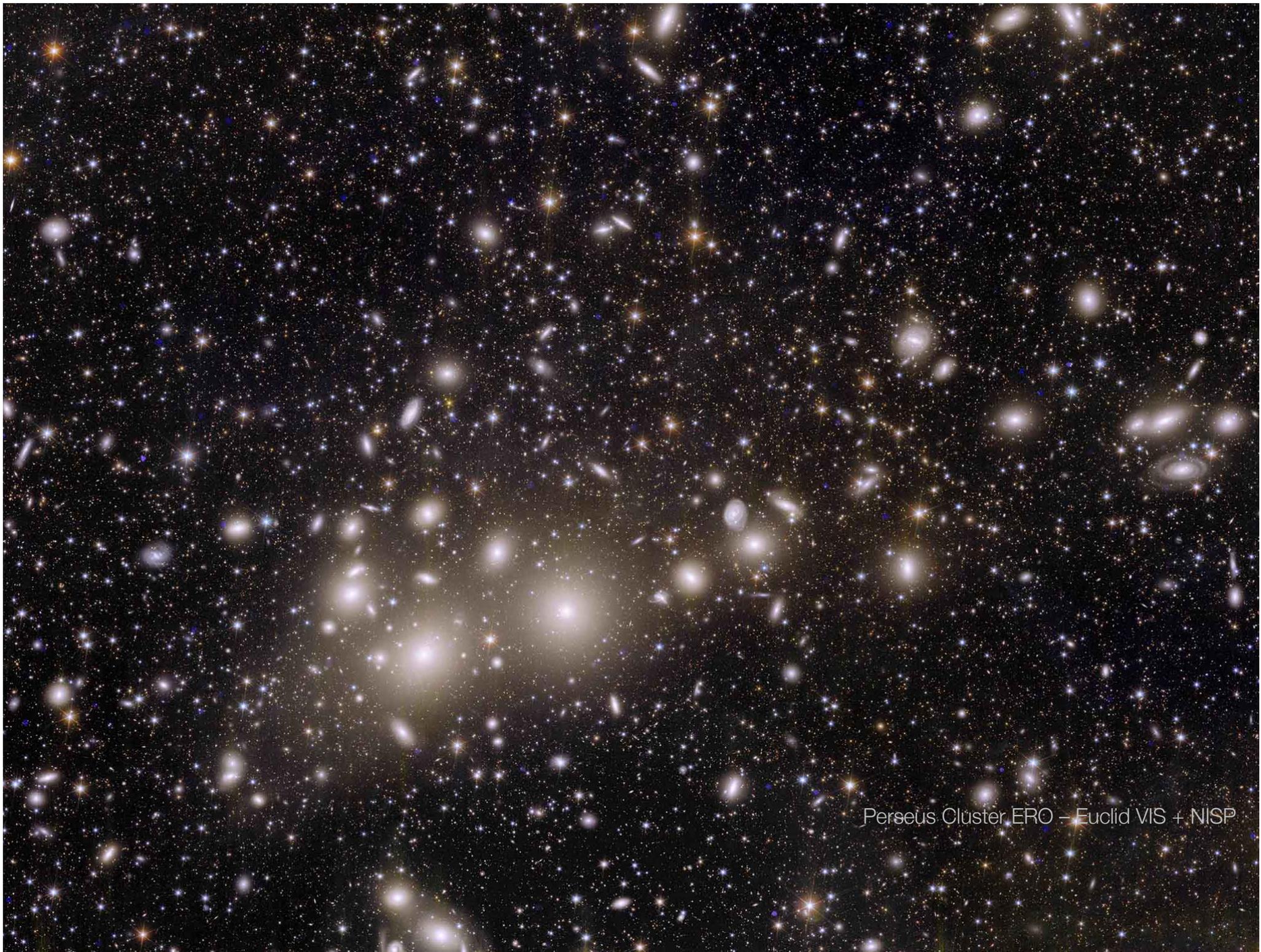


L'évolution des idées en
physique

(pour les passionné.e.s)

Albert Einstein et Leopold Infeld
Écrit en 1936

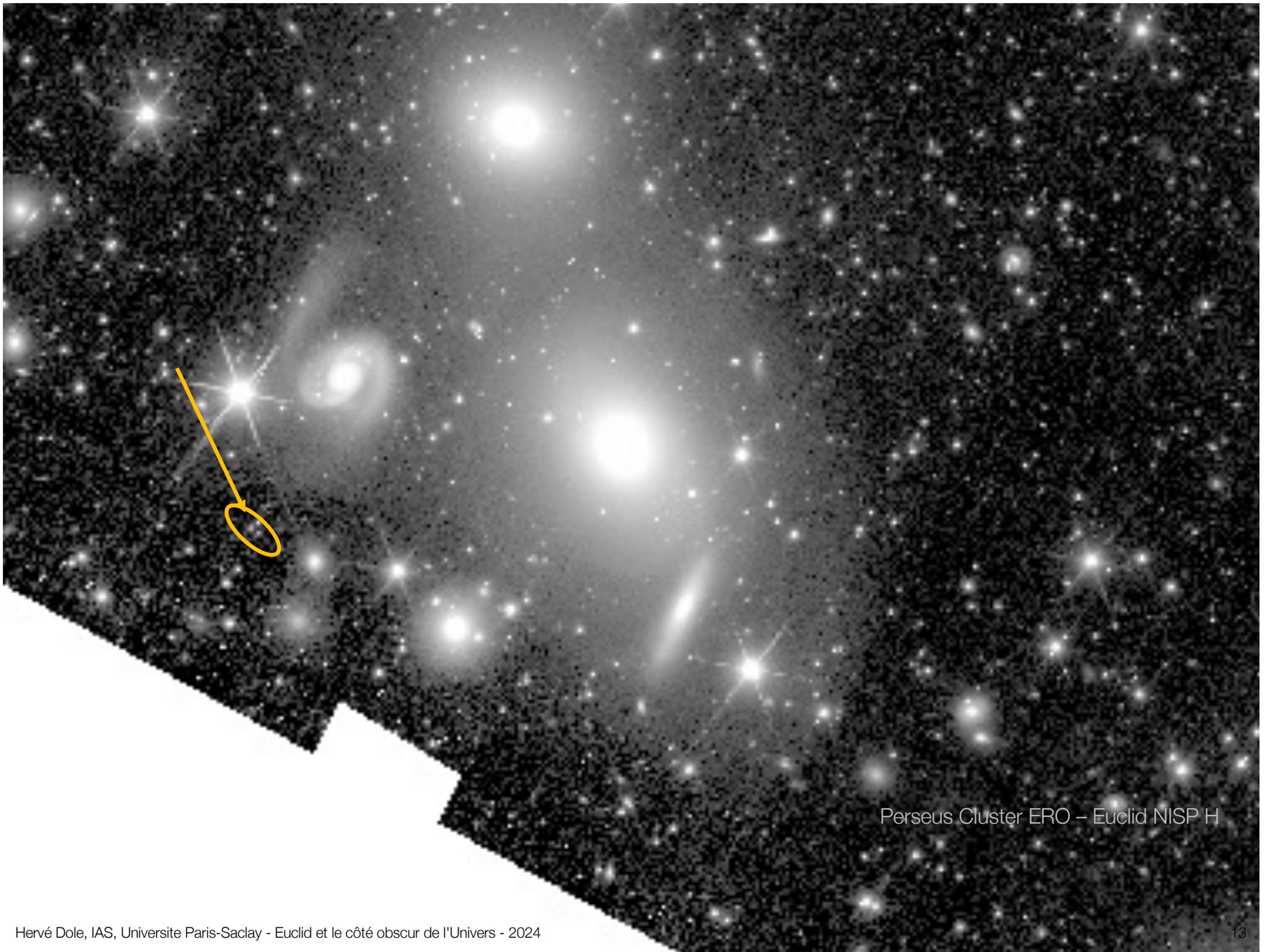
A long time ago in a galaxy far,
far away....



Perseus Cluster ERO – Euclid VIS + NISP



Perseus Cluster ERO – Euclid NISP H α



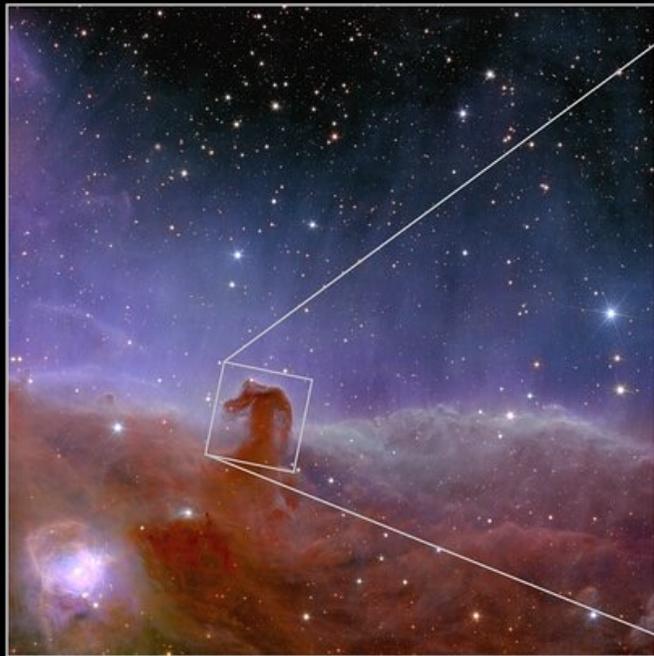
Perseus Cluster ERO – Euclid NISP H



redshift $z=2$

Perseus Cluster ERO - Euclid NISP H

les merveilles sont partout



Euclid (Visible-Infrared)



Hubble (Infrared)



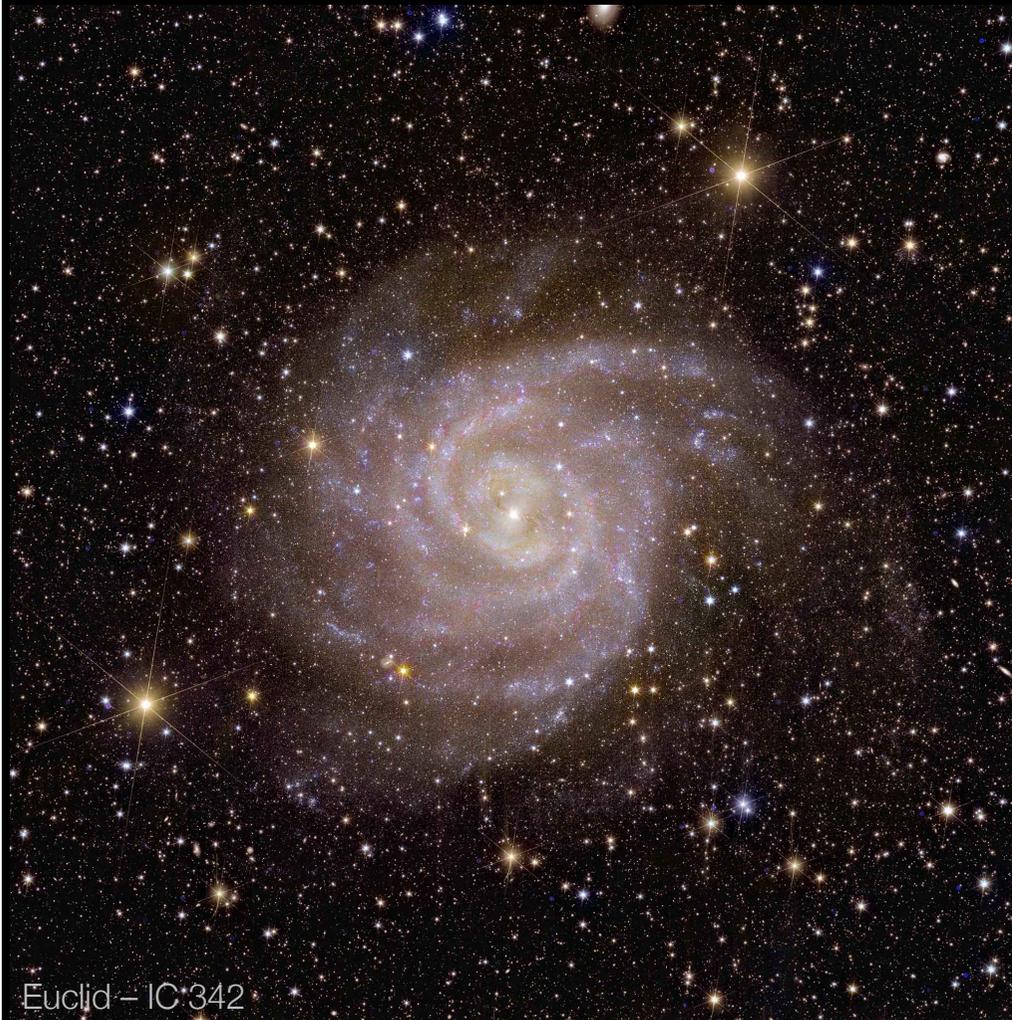
Webb (Infrared)

les merveilles sont partout



JWST

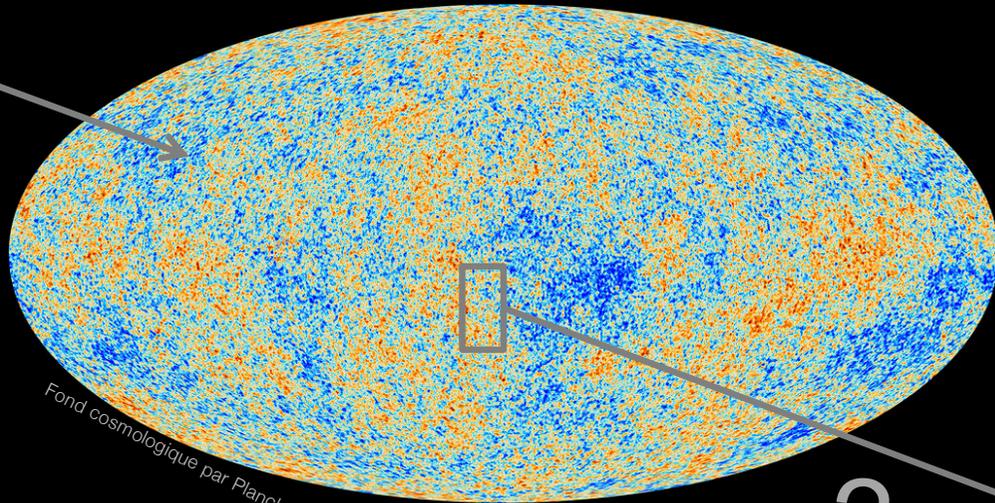
les merveilles sont partout



les questions sont partout

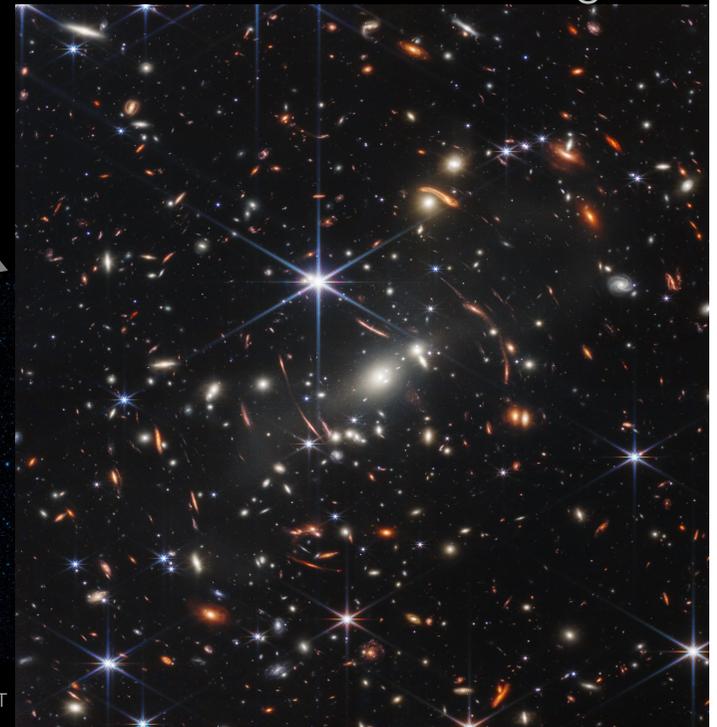
Univers primordial
homogène

?



Univers récent structuré,
hétérogène

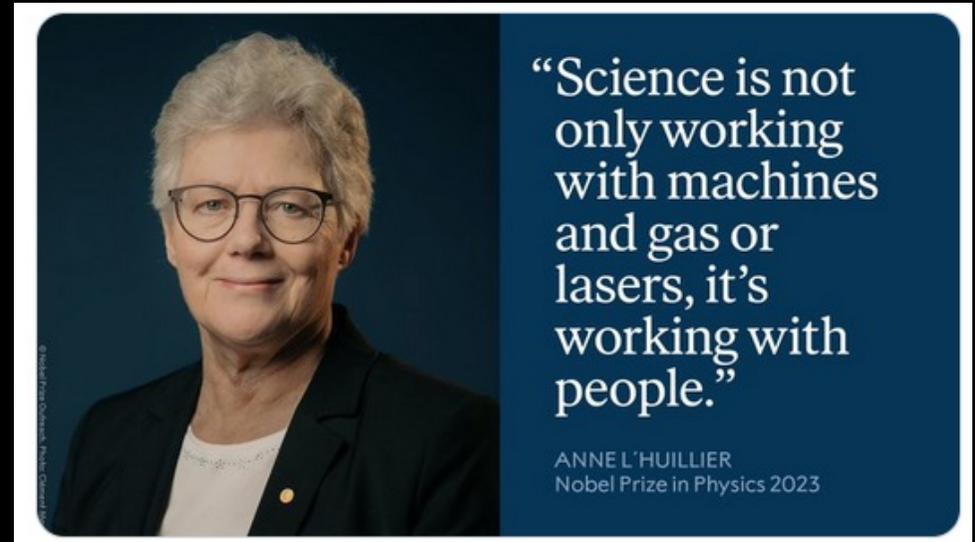
?



Histoire ? Contenu ?
Lois physiques ?

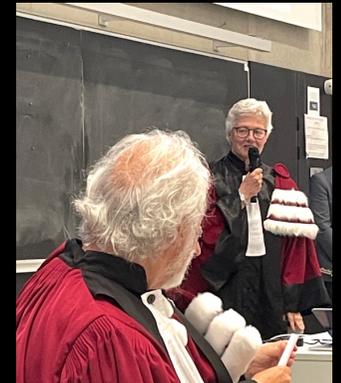
Galaxies
Spitzer, JWST

les questions sont discutées par des humains



4 messages clés de Anne L'Huilier

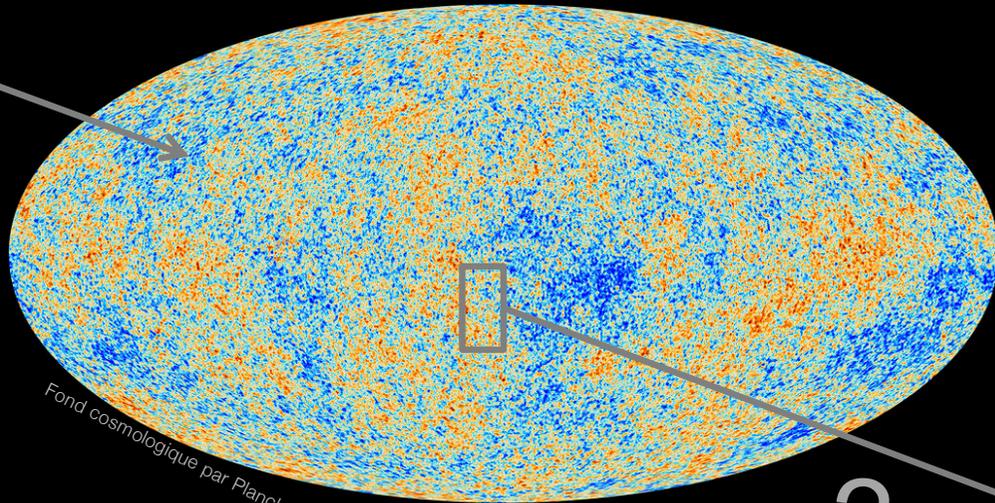
- 1- saisir les opportunités
- 2- être persévérant; n'abandonnez pas.
- 3- prendre soin des gens
- 4- viser une vie équilibrée.



les questions sont partout

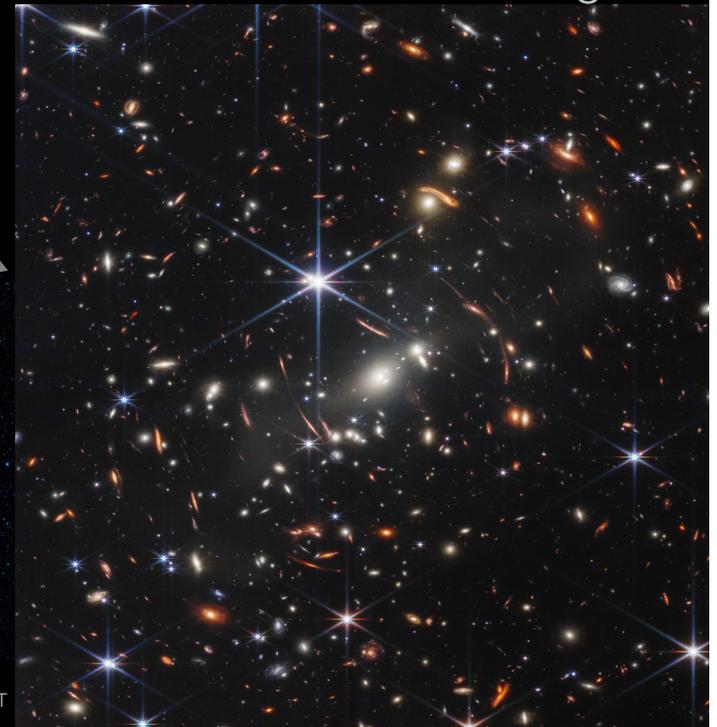
Univers primordial
homogène

?



Univers récent structuré,
hétérogène

?



Histoire ? Contenu ?
Lois physiques ?

Galaxies
Spitzer, JWST

Participez avec votre smartphone



1 Connectez-vous sur
www.wooclap.com/ASTRO131

2 Vous pouvez participer



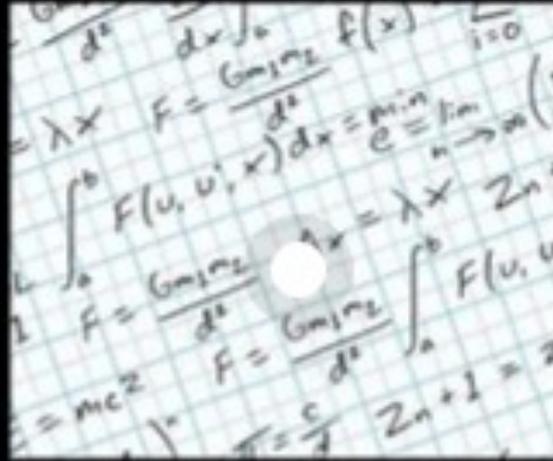
1 Pas encore connecté ? Envoyez
[@ASTRO131](#) au [06 44 60 96 62](tel:0644609662)

2 Vous pouvez participer

ASTROPHYSICIST



what people think I do



what friends think I do



what Mom thinks I do



what I think I do

```
def getParameter(parameter, database, view, *args):
    return convert(saski_db.getParameter(parameter, database, view, *args))

def main():
    #print saski_db.count('saski', 'blueSample')
    #saski_db.createDB('DBFile')
    data = sq.getParameter(DBFile, delimiters=',', comments='#', dtype = [['objID', [524], 'r', float], ['dec',
    ['petroMag r', float], ['petroMag g', float], ['petroMag r', float], ['petroMag i', float], ['petroMag z', float],
    ['petroMag r', float], ['petroMag r', float], ['petroMag r', float], ['petroMag r', float], ['exti
    ['extinction r', float], ['extinction i', float], ['extinction z', float], ['look r', float], ['look r', float],
    ['look r', float], ['look r', float], ['look r', float], ['look r', float], ['look r', float], names=True], missing=0
    plotData = [data[1][1], data[1][2]]
    print plotData
    plotScatter(plotData, 'red', 'black', 'r vs z', 'Apparent magnitude vs. redshift', 'z', 'r')
    exit()
```

what I really do

l'astrophysique

Étude scientifique de l'univers, de son histoire, de ses constituants, des lois physiques.
Moyens: théorie, ordinateurs, observations (sol et espace), expériences de laboratoire.



Los Angeles



Los Angeles



Rome



Groeningen

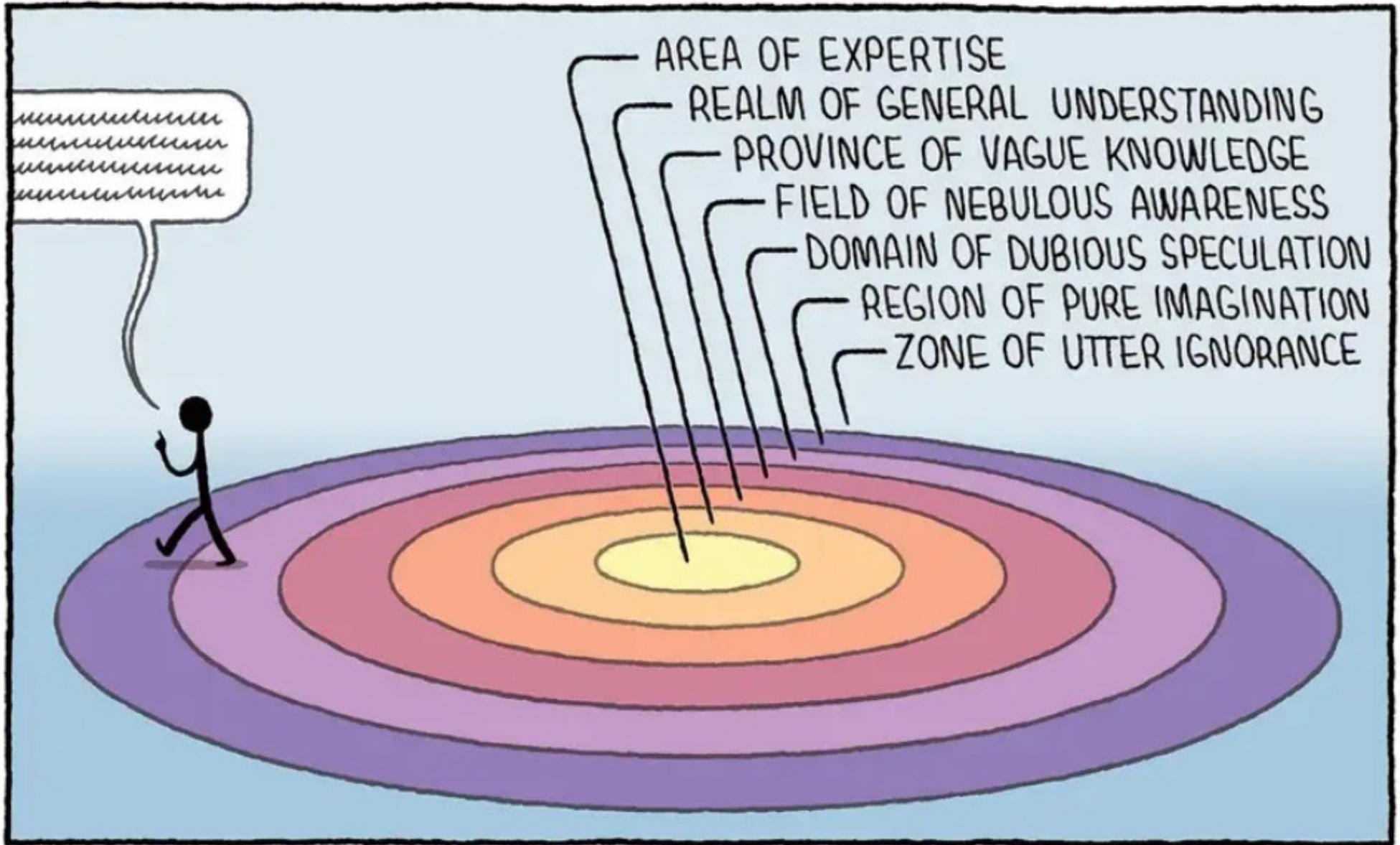


Los Angeles



Hawaii

Qui s'exprime, pour dire quoi ?



TOM GAULD for NEW SCIENTIST

2023

À propos du complotisme

« Toujours préférer l'hypothèse de la connerie à celle du complot. La connerie est courante. Le complot exige un esprit rare”.

Michel Rocard

“Les complotistes sèment le doute, mais ils ne doutent pas”

Denis Kambouchner, Philosophe.
Cf aussi Julien Giry.

Cf Descartes

0. La Terre plate ?

- Eratosthène
 - -276; -194



0. Système géocentrique

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Galilée, ou le début de la méthode scientifique

Un astronaute, sur la Lune, laisse tomber simultanément une plume et un marteau.

Lequel arrivera en premier au sol ?

- Le marteau
- La plume
- Les deux ?



Apollo XV, 1971, Dave Scott

Galilée, ou le début de la méthode scientifique



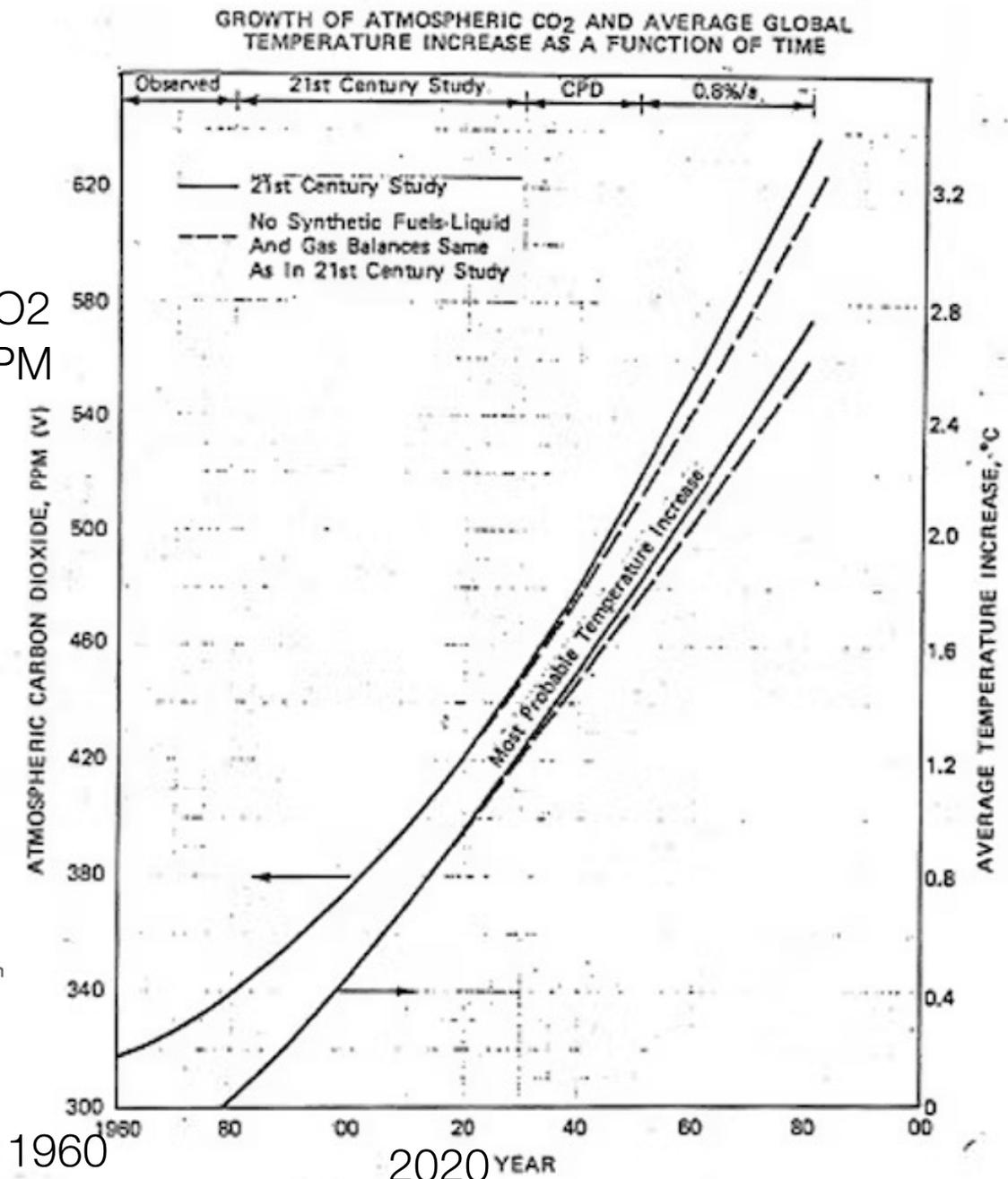
Apollo 15, 1971, Dave Scott

<https://apod.nasa.gov/apod/ap111101.html>

Notion de modèle: ici le CO2 dans l'atm

Modèle de ExxonMobil
de 1982

CO2
PPM



A figure from Exxon's internal climate change report from 1982, predicting how much carbon dioxide would build up from fossil fuels and how much global warming that would cause through the 21st century unless action was taken. Exxon's projection has been remarkably accurate.

Notion de modèle: ici le CO2 dans l'atm

RESEARCH

REVIEW SUMMARY

CLIMATE PROJECTION

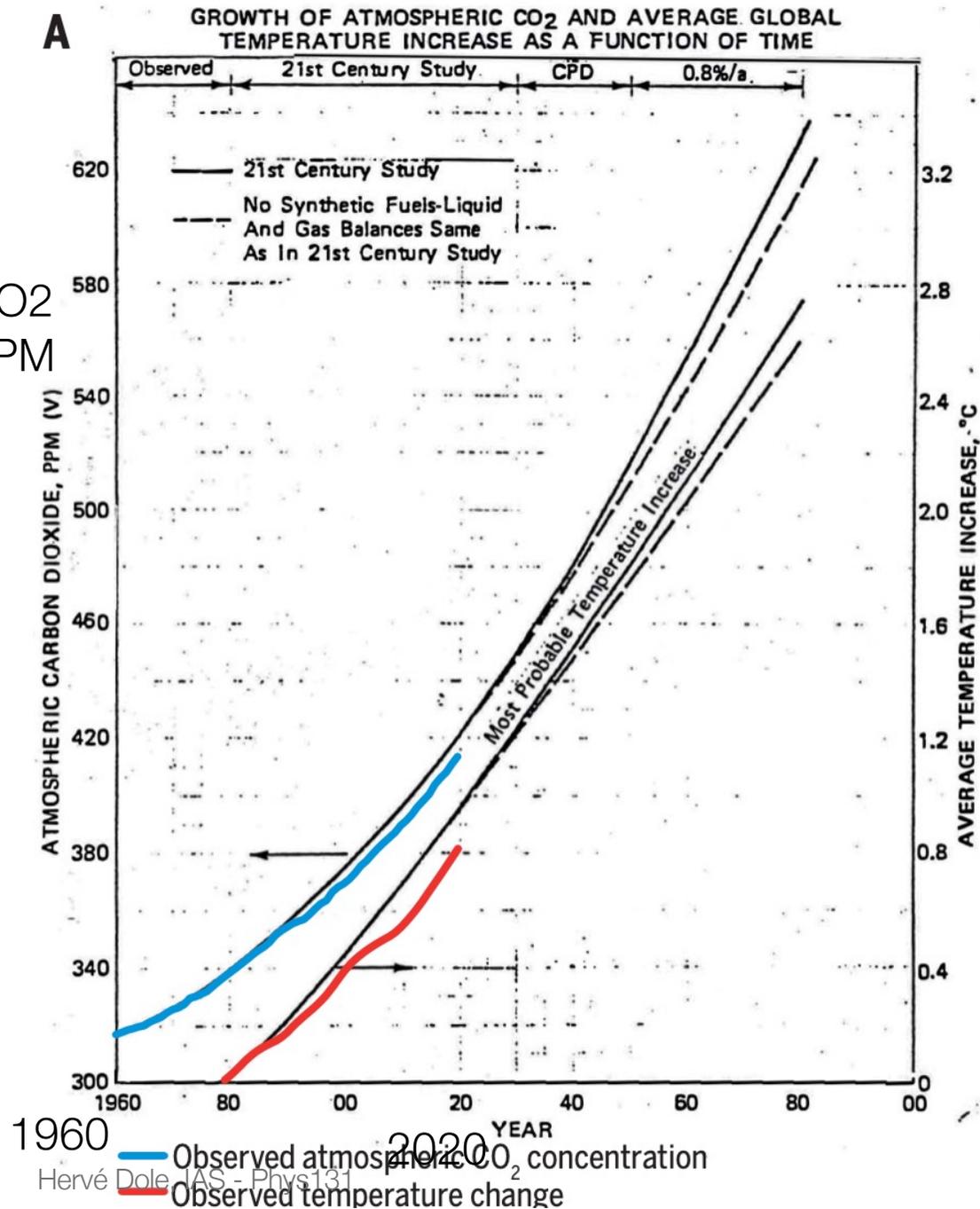
Assessing ExxonMobil's global warming projections

G. Supran*, S. Rahmstorf, N. Oreskes

BACKGROUND: In 2015, investigative journalists discovered internal company memos indicating that ExxonMobil's projections occur over time in response to rising atmospheric greenhouse gas concentrations. Yet

G. Supran et al., 2023, Science, 379, eabk0063

CO2
PPM



<https://doi.org/10.1126/science.abk0063>

Notion de modèle: ici le CO2 dans l'atm

RESEARCH

REVIEW SUMMARY

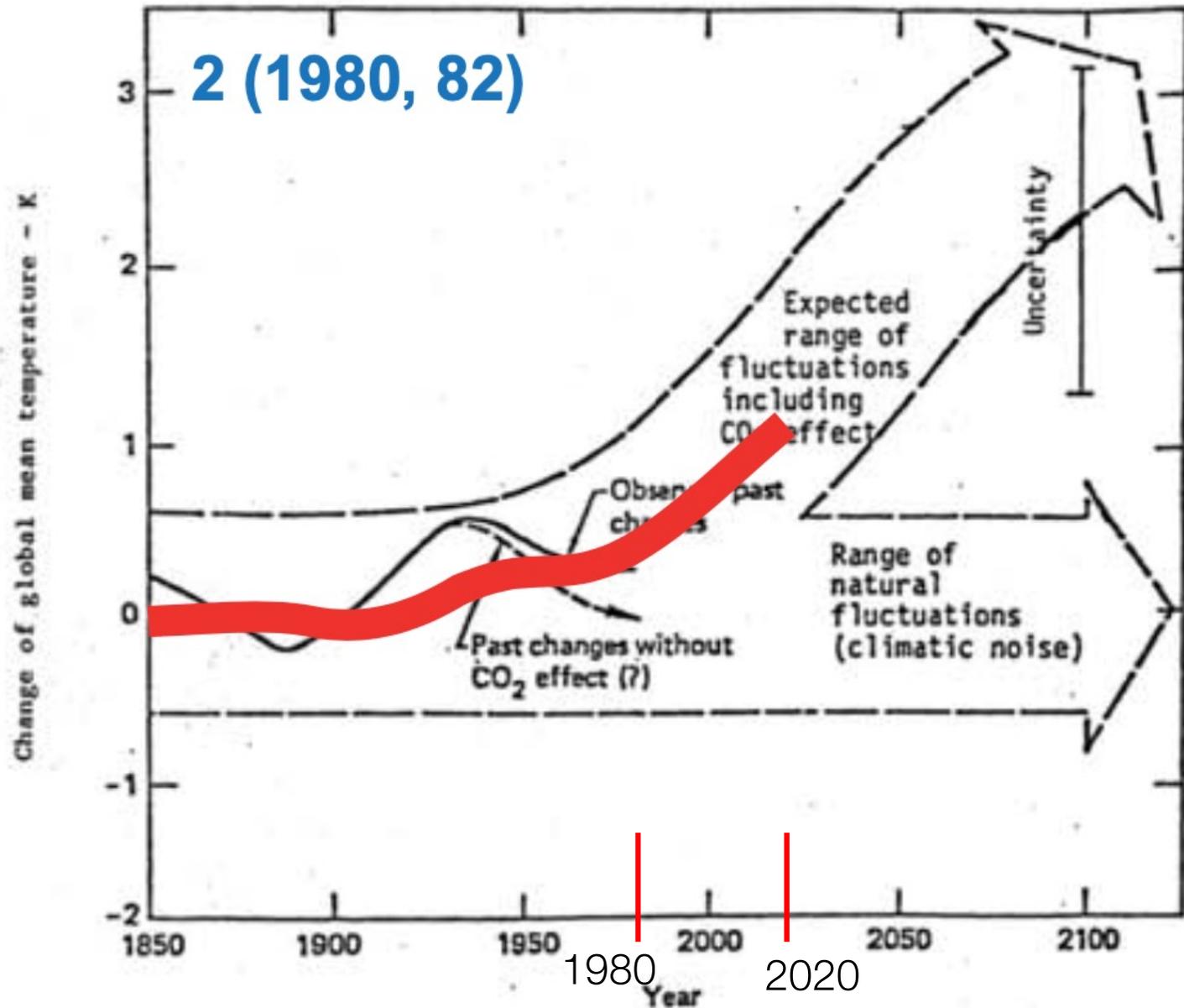
CLIMATE PROJECTION

Assessing ExxonMobil's global warming projections

G. Supran*, S. Rahmstorf, N. Oreskes

BACKGROUND: In 2015, investigative journalists discovered internal company memos indicating that ExxonMobil scientists predicted global warming would occur over time in response to rising atmospheric greenhouse gas concentrations. Yet

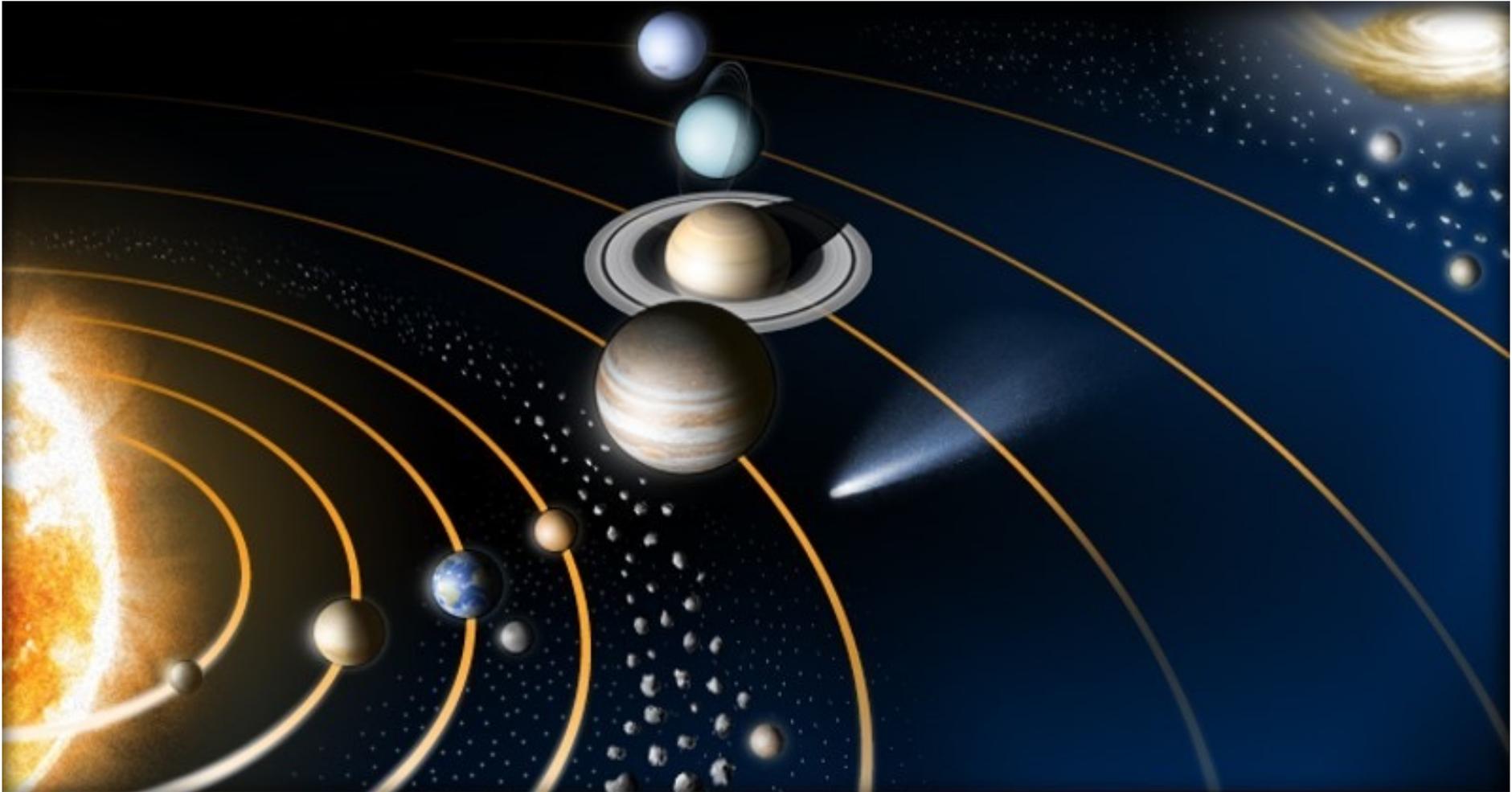
G. Supran et al., 2023,
Science, 379, eabk0063



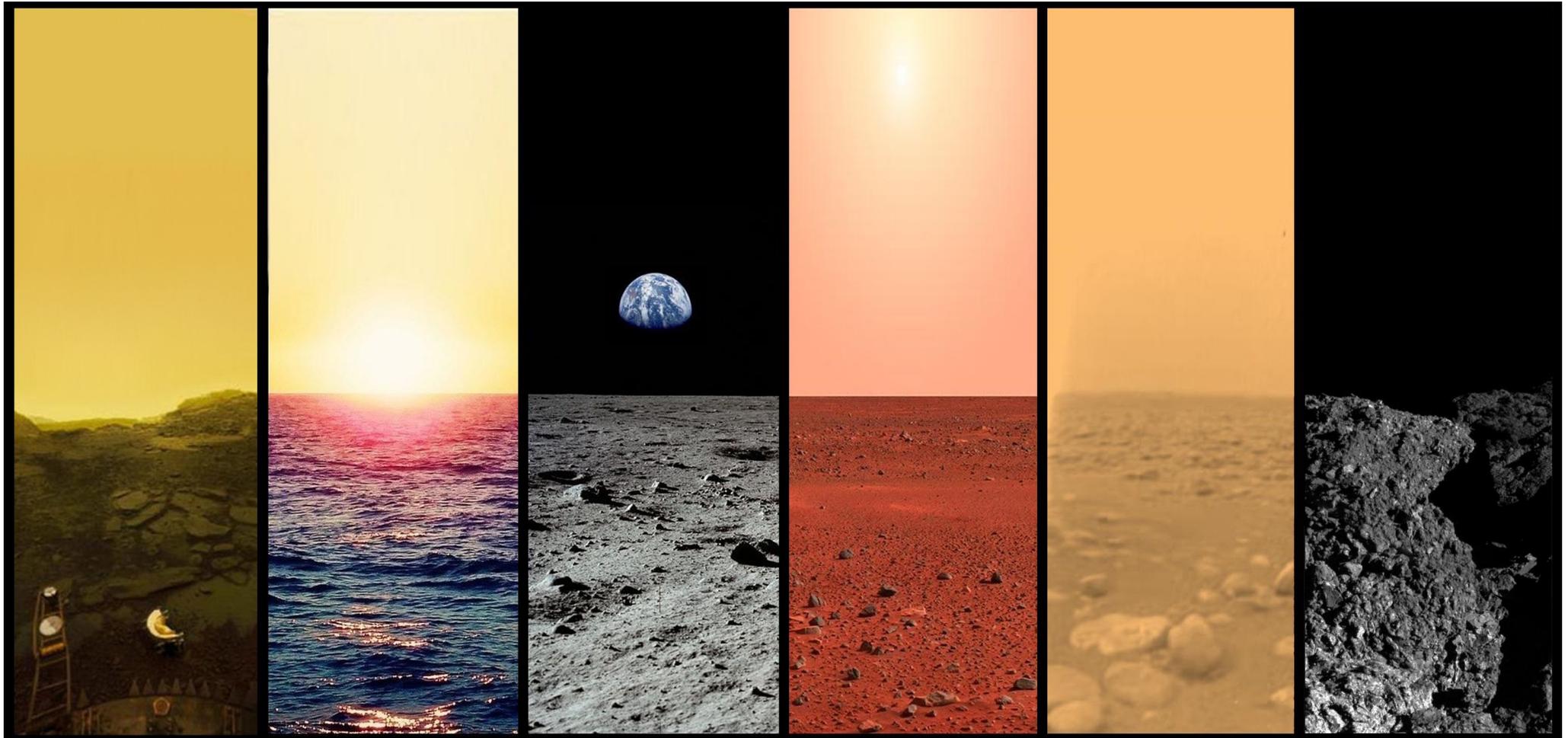
<https://doi.org/10.1126/science.abk0063>

1. Petit tour de l'univers

1. notre Système Solaire



paysages du système solaire



1

2

3

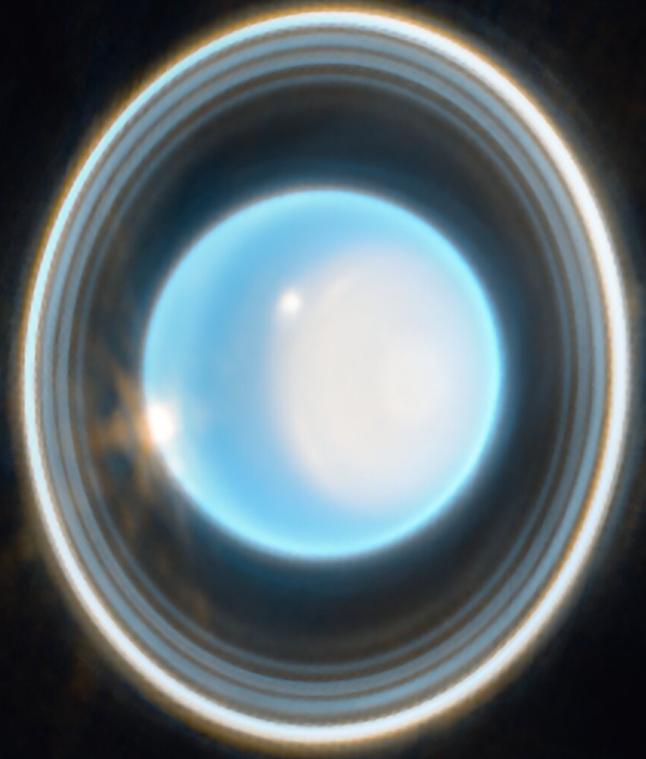
4

5

6







2. Étoiles proches



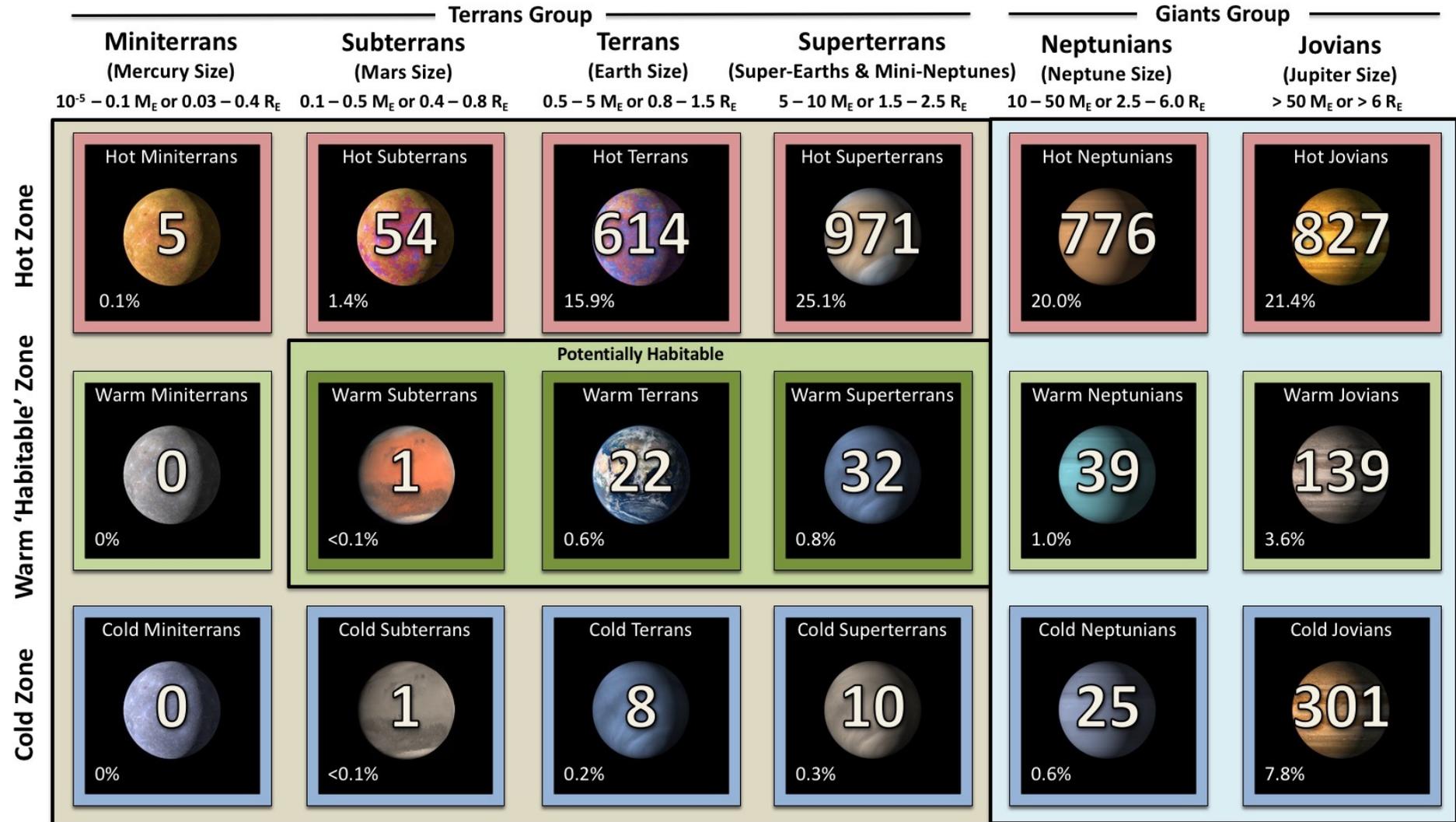
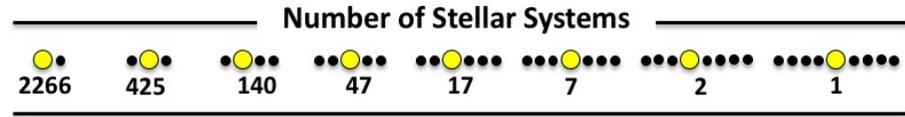
amas d'étoiles par Hubble (NASA/ESA)

planètes autour d'autres étoiles: exoplanètes



The Periodic Table of Exoplanets

Over 3800 Exoplanets



M_E = Earth Mass, R_E = Earth Radius

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jul 2018

planètes autour d'autres étoiles: exoplanètes



The Per
Over 3800

Minterran
(Mercury Siz

$10^{-5} - 0.1 M_E$ or $0.03 R_E$

Hot Zone

Hot Minter



5

0.1%

Warm 'Habitable' Zone

Warm M



0%

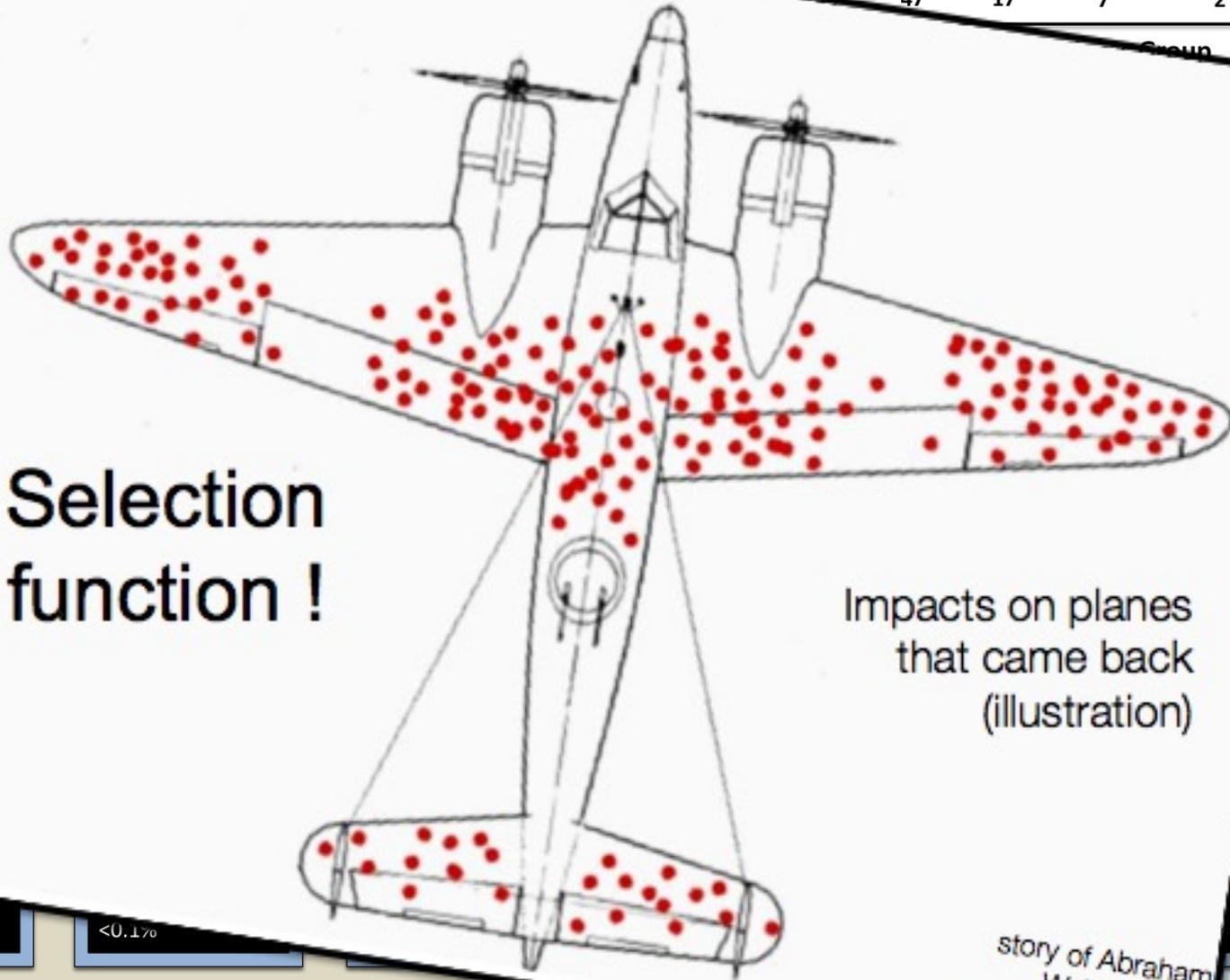
Cold Zone

Col



0%

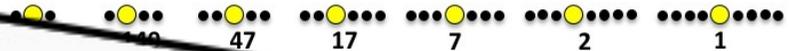
Selection function !



Impacts on planes that came back (illustration)

story of Abraham Wald in WWII
https://en.wikipedia.org/wiki/Survivorship_bias

Number of Stellar Systems



Group

ians

9

Jovians

301

M_E = Earth Mass, R_E = Earth Radius

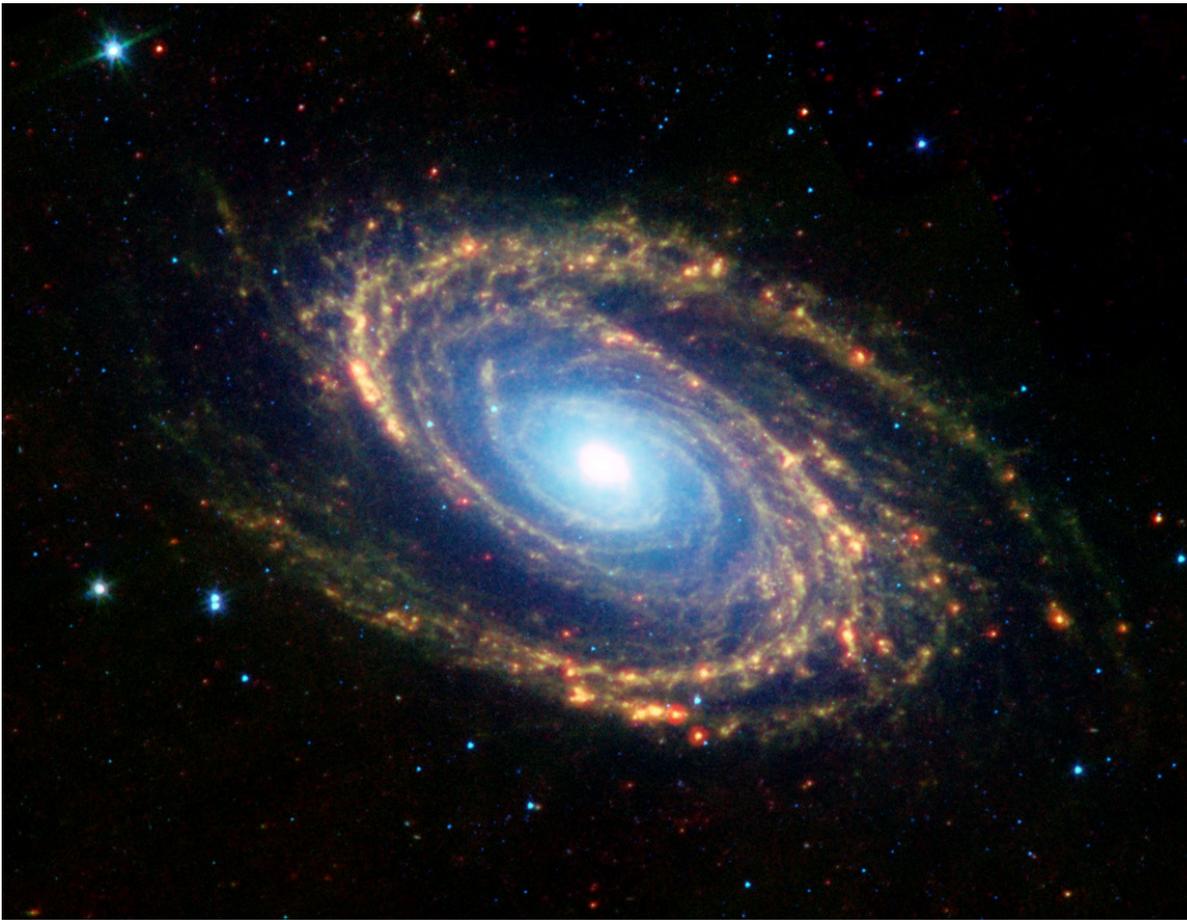
...o (phl.upr.edu) Jul 2018

3. dans les galaxies: nébuleuses, étoiles, gaz



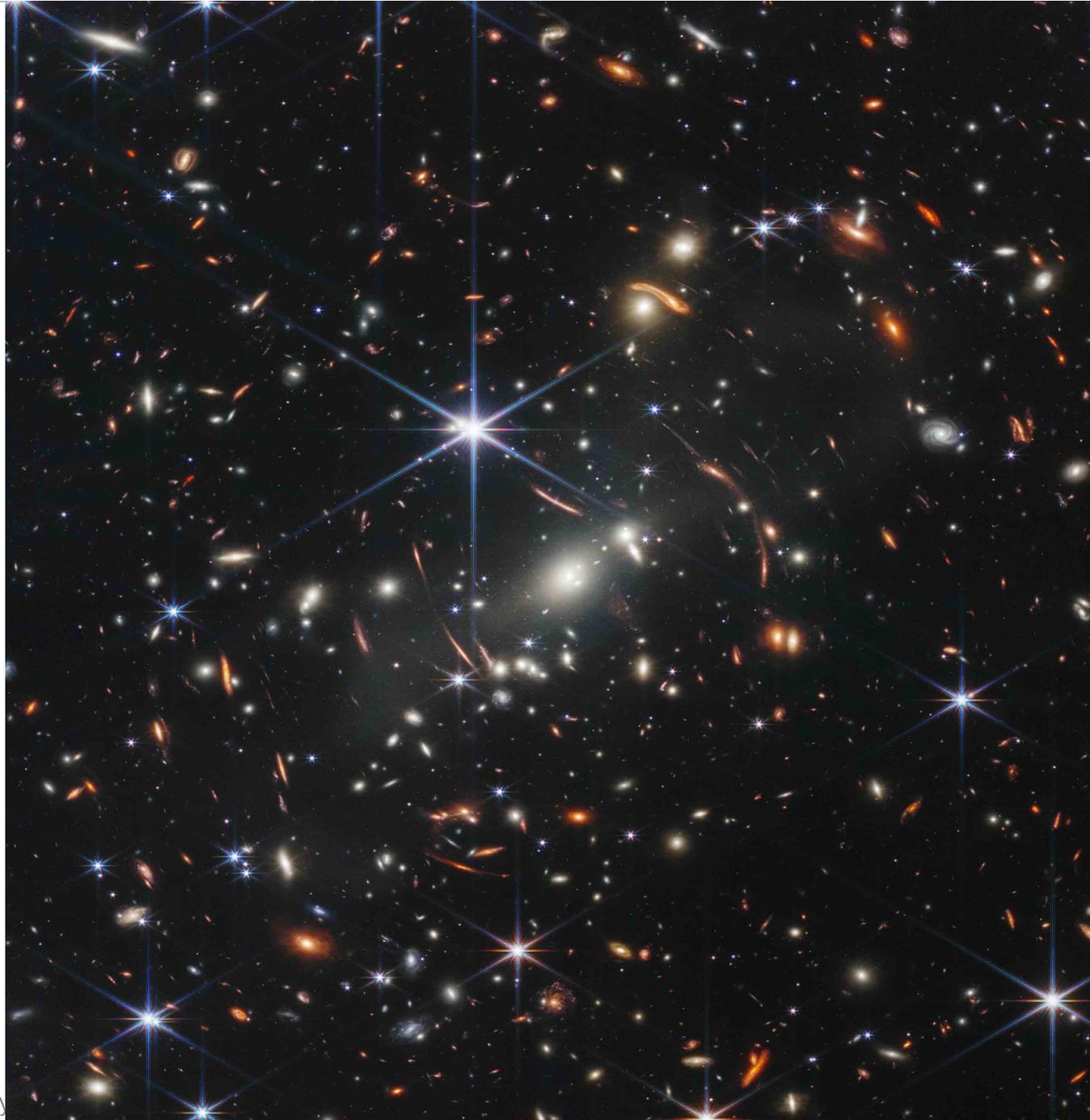
à gauche: M16 nébuleuse aigle par JWST (NASA/ESA/CSA)
en haut à droite: nébuleuse dans Eta Carène par Hubble

4. Galaxies proches et lointaines



Images; Spitzer satellite NASA JPL Caltech
M81, M31, M104 dans l'infrarouge

5. amas de galaxies



6. la première lumière de l'Univers

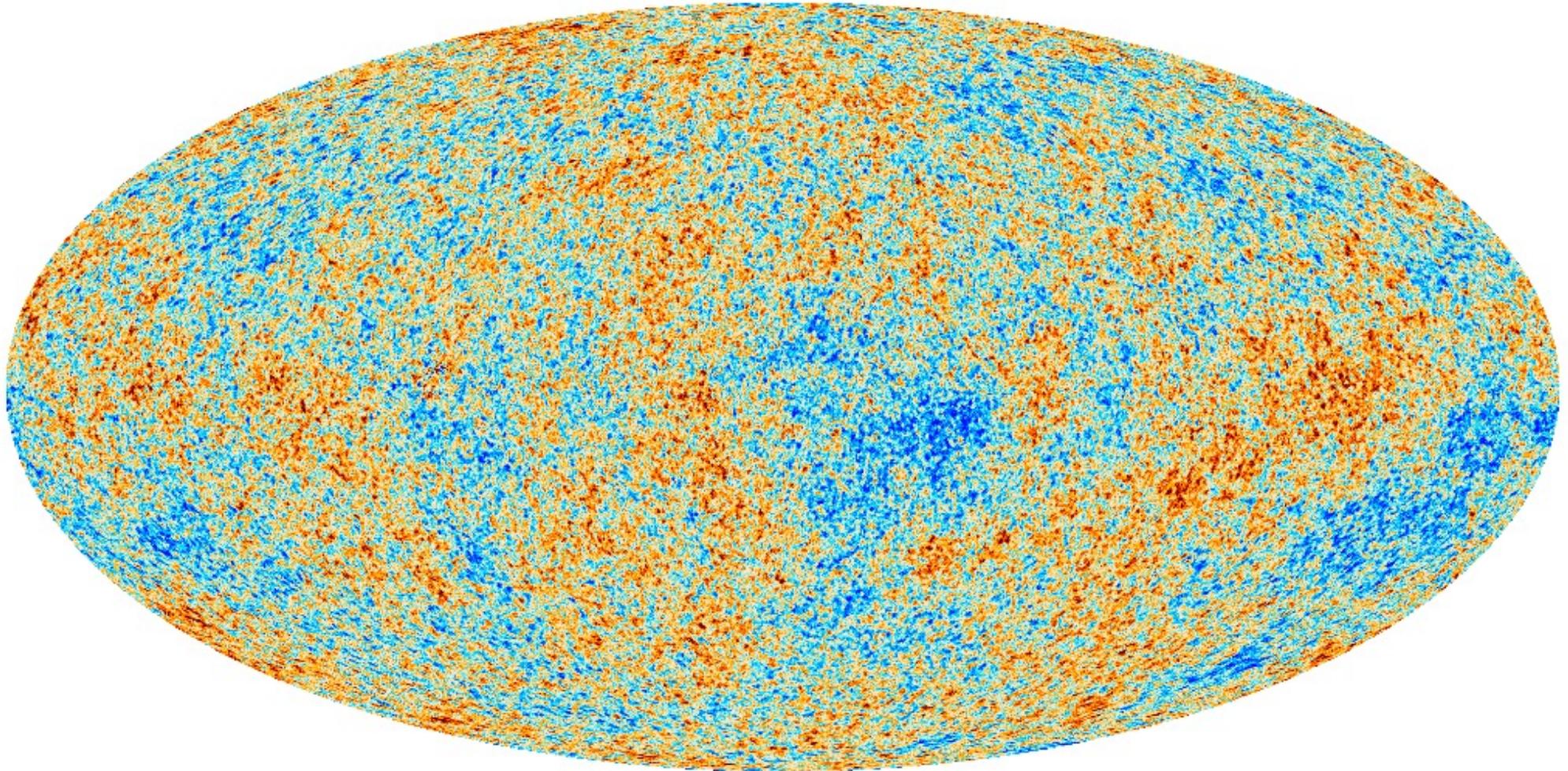


6. la première lumière de l'Univers

le rayonnement fossile
ou
fond cosmologique

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

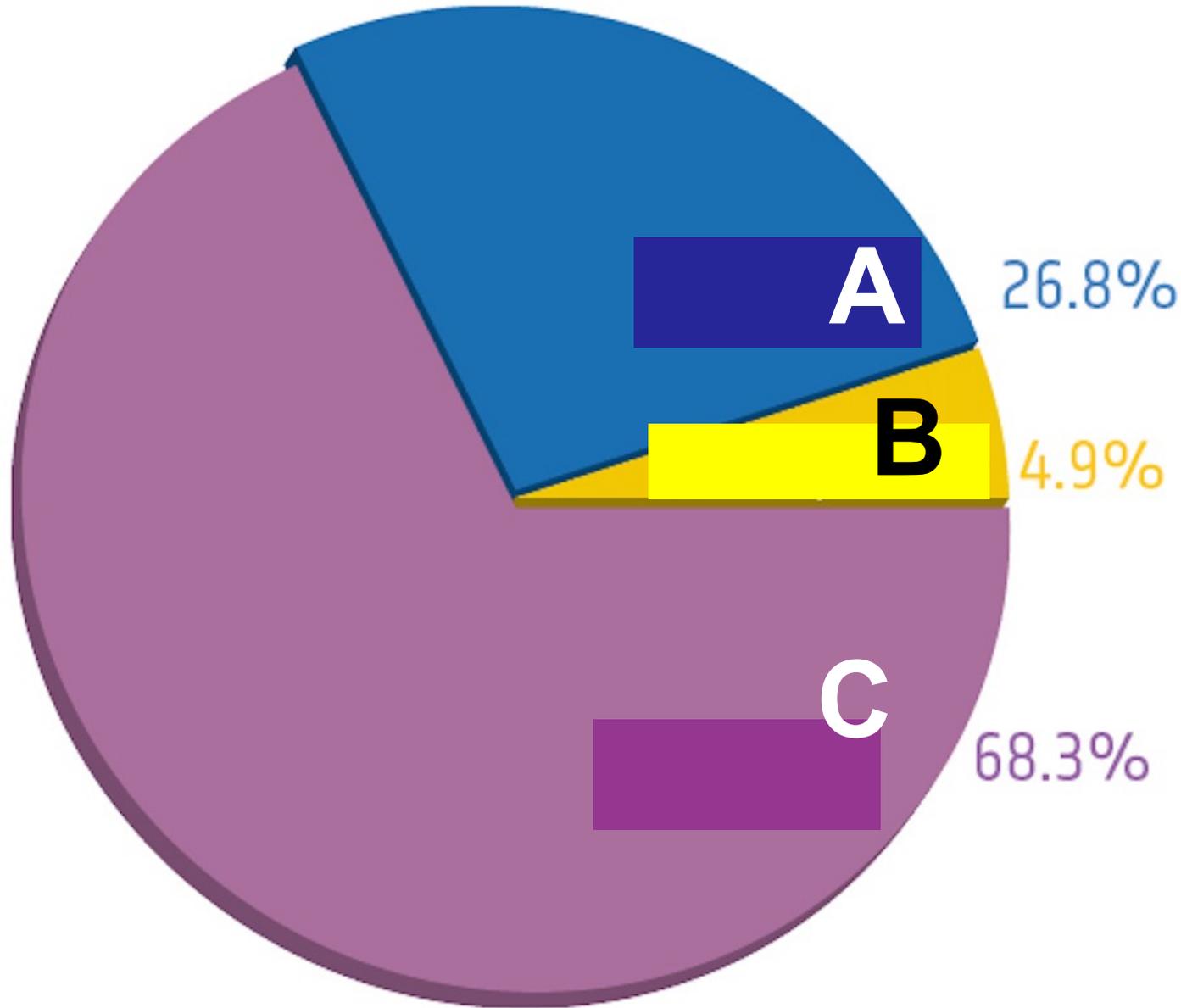
Image la plus lointaine de
l'Univers, quand il était tout jeune,
peu de temps après le Big Bang



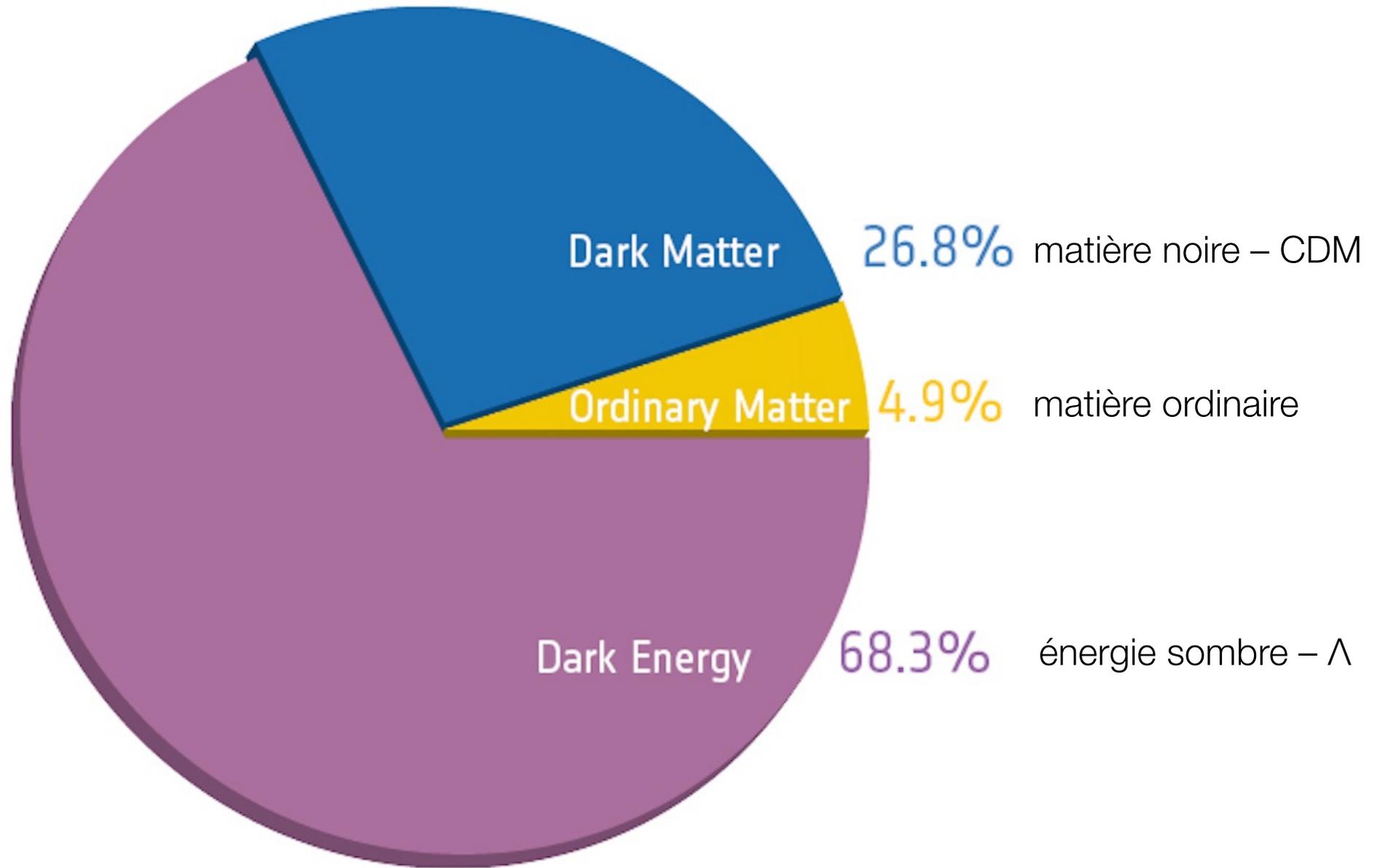
Planck 15 mois
Planck Collaboration, 2013

<http://www.planck.fr> 45

6. la première lumière de l'Univers



6. la première lumière de l'Univers



2. L'astrophysique est t-elle une science ?

2. science ?

- L'astrophysique est-elle une science ?
 - la méthode expérimentale exige reproductibilité des expériences. Or nous n'avons qu'un seul univers...
 - L'astrophysique est une **science d'observation**, comme une science naturelle.
 - L'astrophysique est aussi une **science abstraite**: basée sur des principes physiques fondamentaux, elle essaie de reconstituer l'histoire de l'univers.
- fondée sur des **principes** et confrontée aux **observations**, l'astrophysique est bien une **science**.

1 PHYSICS

1.1 History

Aristotle said a bunch of stuff that was wrong. Galileo and Newton fixed things up. Then Einstein broke everything again. Now, we've basically got it all worked out, except for small stuff, big stuff, hot stuff, cold stuff, fast stuff, heavy stuff, dark stuff, turbulence, and the concept of time.

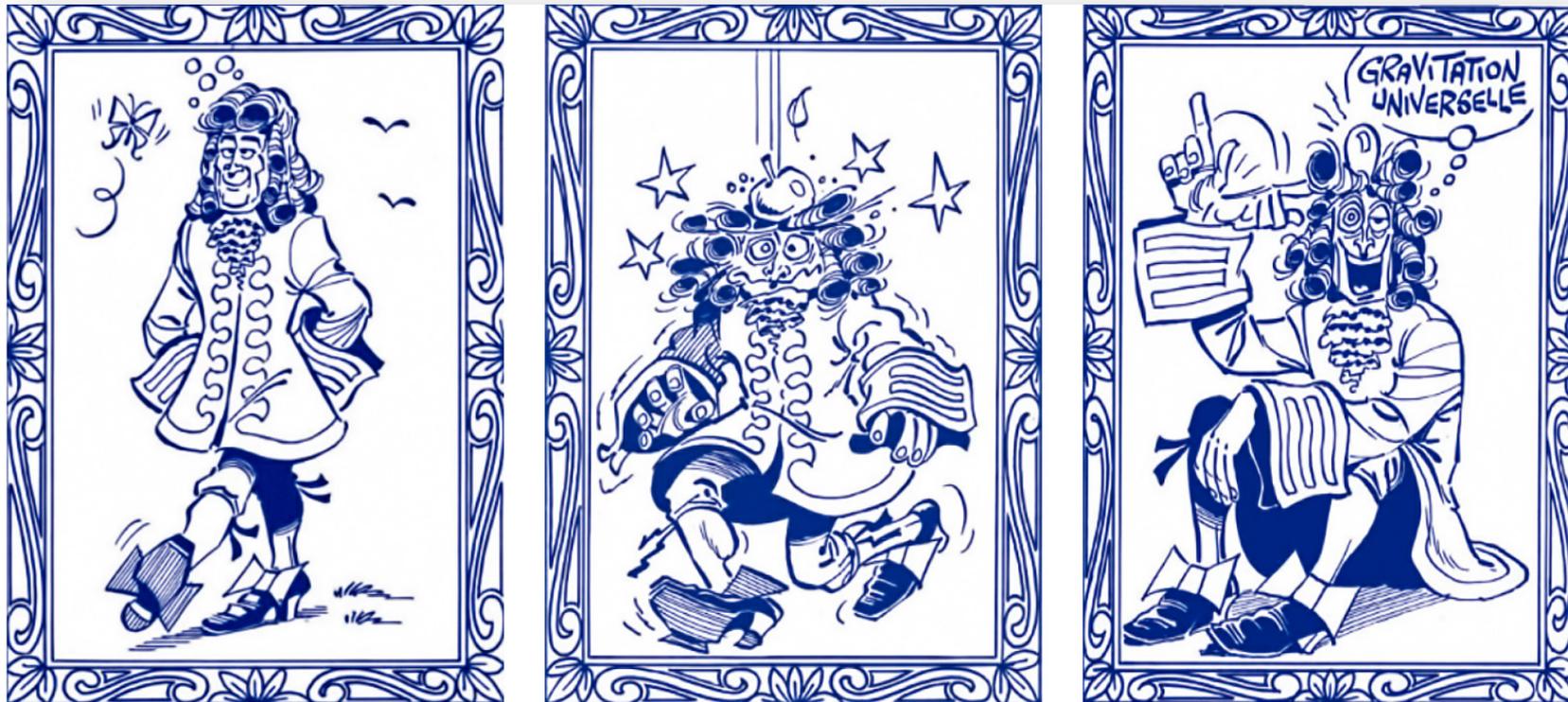
Found on the internet

Science by J. Peebles & Gotlib

Besoin de mesures+expériences ET de théories

We make progress by ideas, and by measurements that inspire and attack ideas, a process that, by repeated checks and successive approximations, may reduce some ideas to theories that are so thoroughly tested as to qualify for entry in established canonical science.

P. J. E. Peebles, 2015, PNAS, « Dark Matter »



The Nobel Prize in Physics 2019



2. astrophysique: postulats

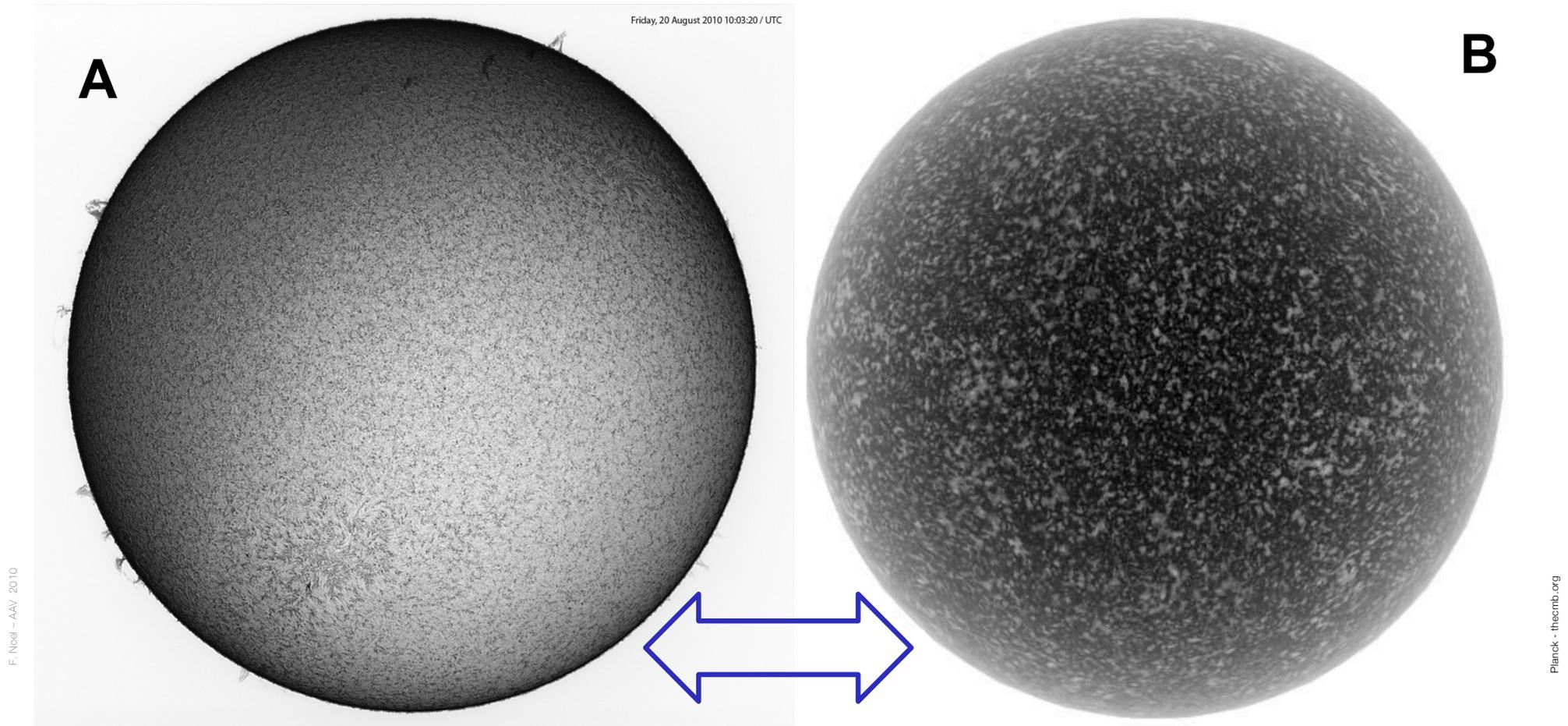
- l'Univers est intelligible
 - malgré le fait qu'il soit constitué de la somme de ses constituants, peu ou pas compris individuellement
- les lois de la physique
 - sont valables partout et tout le temps
- Principe cosmologique
 - l'univers est homogène+isotrope a une certaine échelle (grande)
 - aucun lieu n'est privilégié dans le cosmos

2. astrophysique

une définition de l'astrophysique

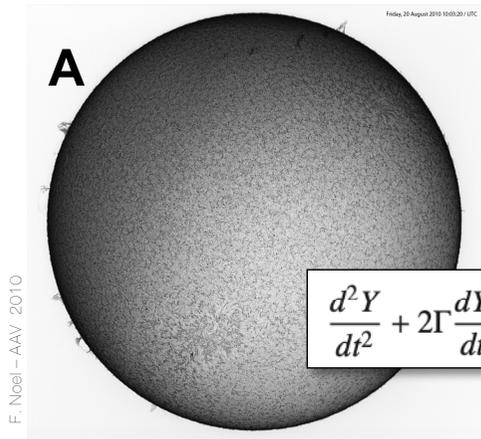
- étude physique des objets célestes, de leurs propriétés, structure et évolution
- science pluridisciplinaire, basée sur la physique
- objets célestes incluent par exemple:
 - l'Univers dans son ensemble -> cosmologie
 - les types de galaxies -> extragalactique
 - les (exo-)planètes -> sciences planétaires
 - la chimie du milieu interstellaire -> astrochimie
 - les processus chimiques prébiotiques -> astrochimie

physique universelle: exemple



comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'**univers** et **ses constituants**.

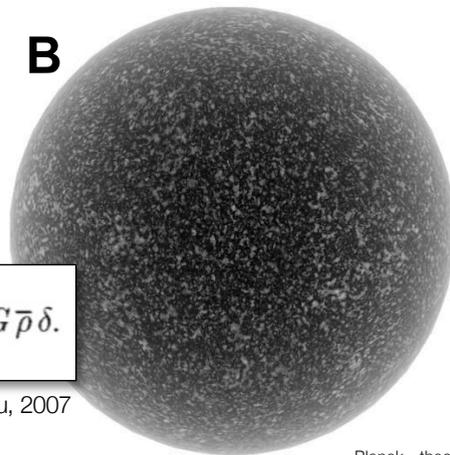
physique universelle: exemple



F. Noël - AAV, 2010

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + 2\Gamma \frac{dY}{dt} + 2\omega_0^2 Y = F(t)$$

Eq 5.2 Lambert, 2007



$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G \bar{\rho} \delta.$$

Eq 4.27 Bernardeau, 2007

Planck - thecmb.org



C

LPS - Université Paris-Saclay

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \beta \frac{dx(t)}{dt} + sx(t) = F_{driv}(t) \quad (1)$$

De Jong et al., 2002

D



Galileo Galilei watching a chandelier swing back and forth at the Cathedral of Pisa. Fresco by Luigi Sabatelli (1772-1850)

Galilée 1564 - 1642

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \sin \theta = 0$$

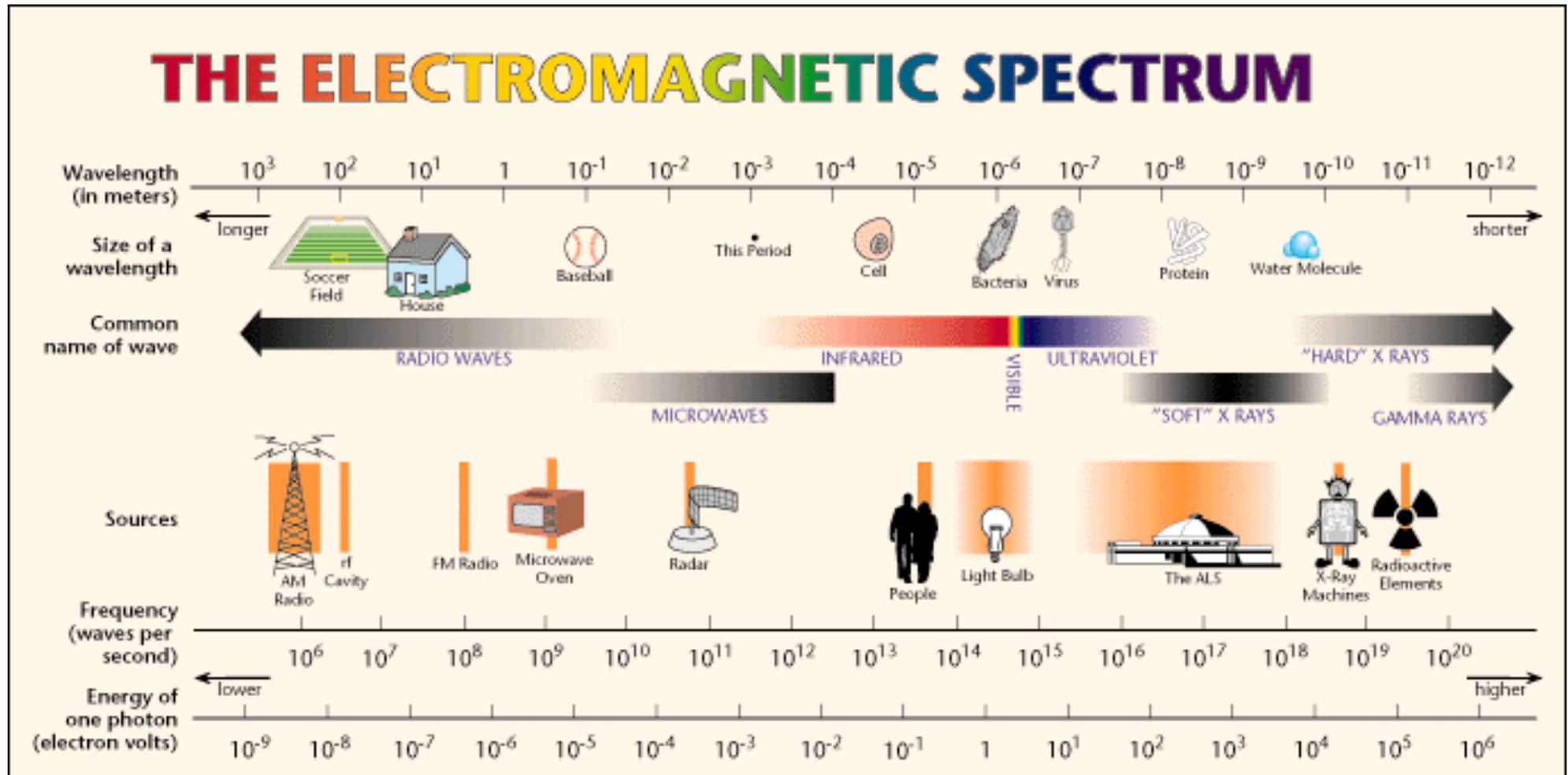
comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'**univers** et **ses constituants**

3. Introduction aux observations

3.1 ordres de grandeurs à connaître

- Temps
 - 1 an $\sim 3 \times 10^7$ s
 - “âge” de l’Univers ~ 13.79 Gans
 - âge du système Solaire ~ 4.5 Gans
- Distances
 - Unités: a-l, et surtout parsec (pc, kpc, Mpc)
 - 1 a-l $\sim 10^{16}$ m
 - 1 pc = 3.26 a-l
 - 1 Mpc $\sim 3 \times 10^{22}$ m
 - Taille d’une galaxie ~ 30 à 100 kpc
 - Taille d’un amas de galaxies ~ 1 à 3 Mpc
- Masse
 - Soleil: 10^{30} kg
- Energie
 - 1eV ~ 10000 K
- Densité de matière baryonique dans l’univers
 - ~ 0.25 proton (ou atome d’Hydrogène) par m^3
 - (densité critique $\sim 6p m^{-3}$)

3.2 longueurs d'onde & fréquences



visible vs infrarouge 1



visible vs infrarouge 2



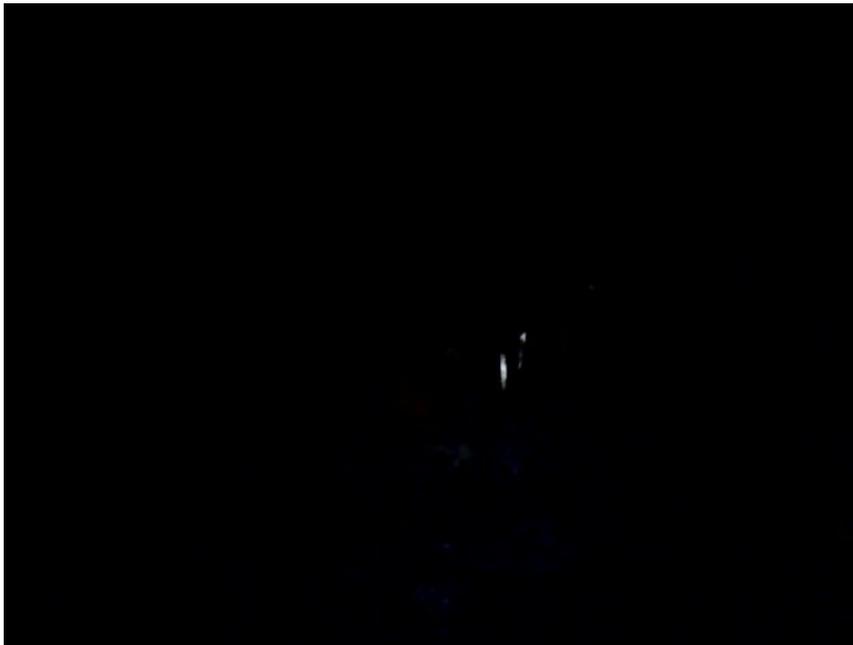
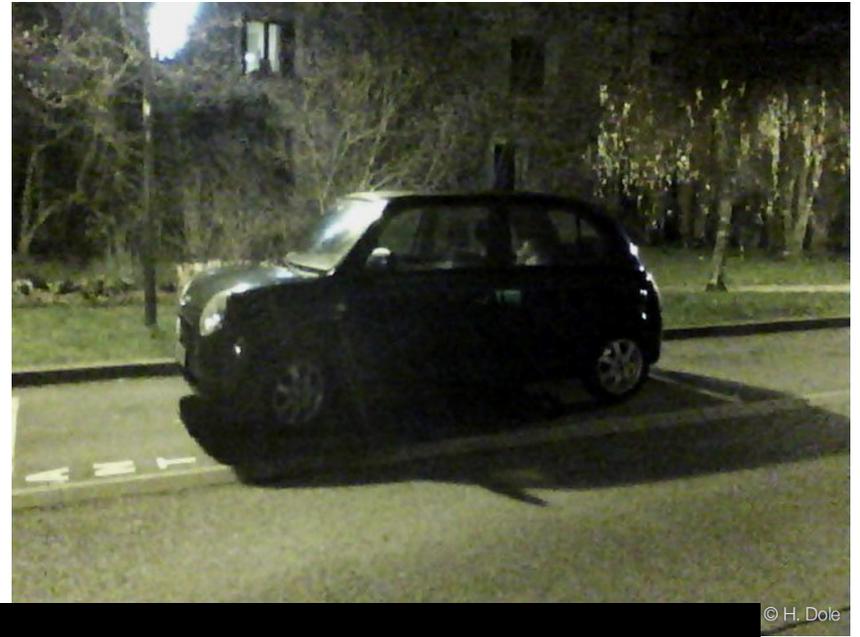
visible vs infrarouge 3



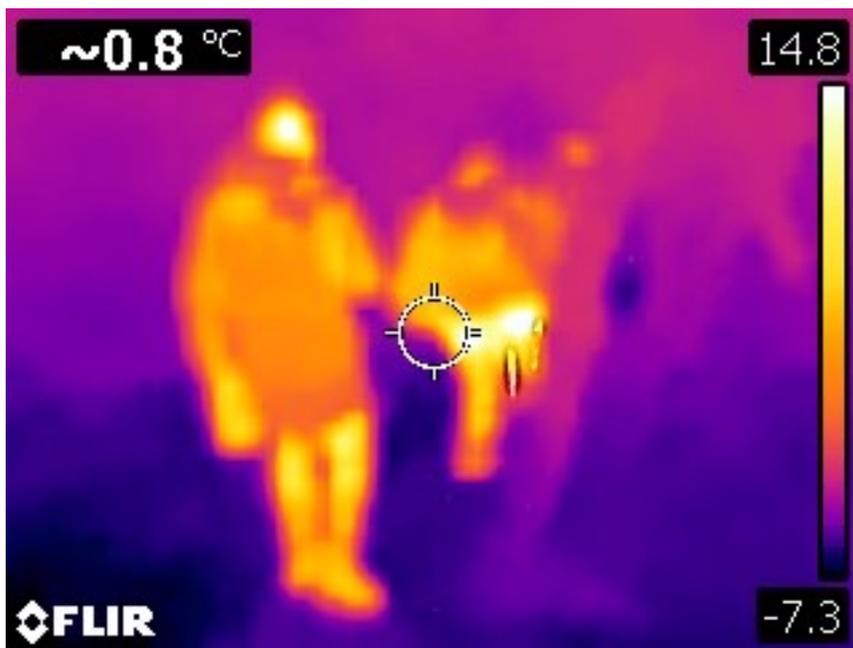
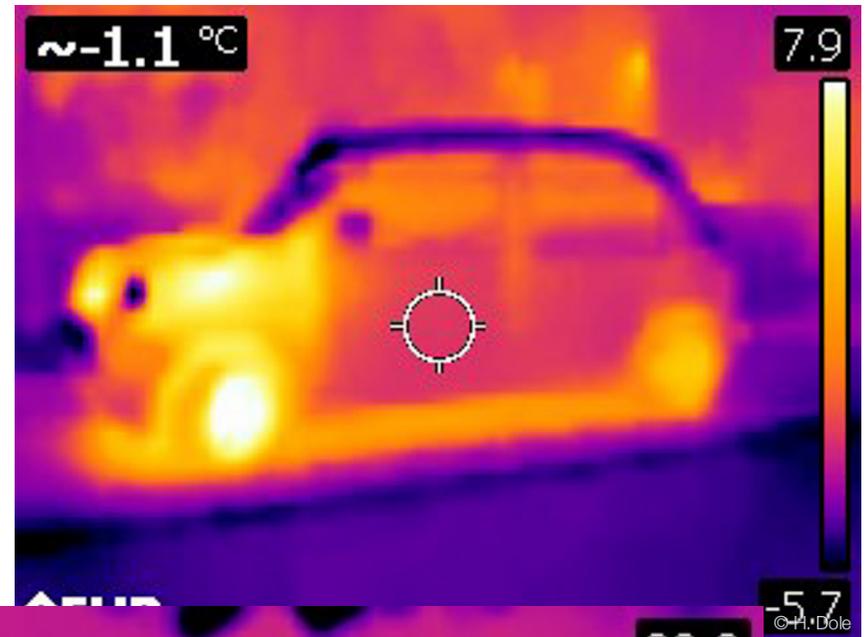
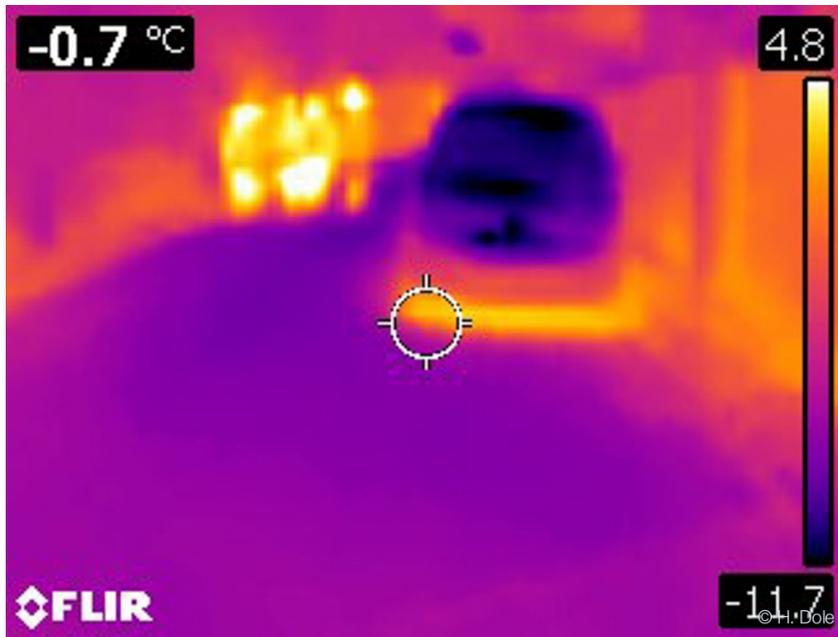
visible vs infrarouge 4



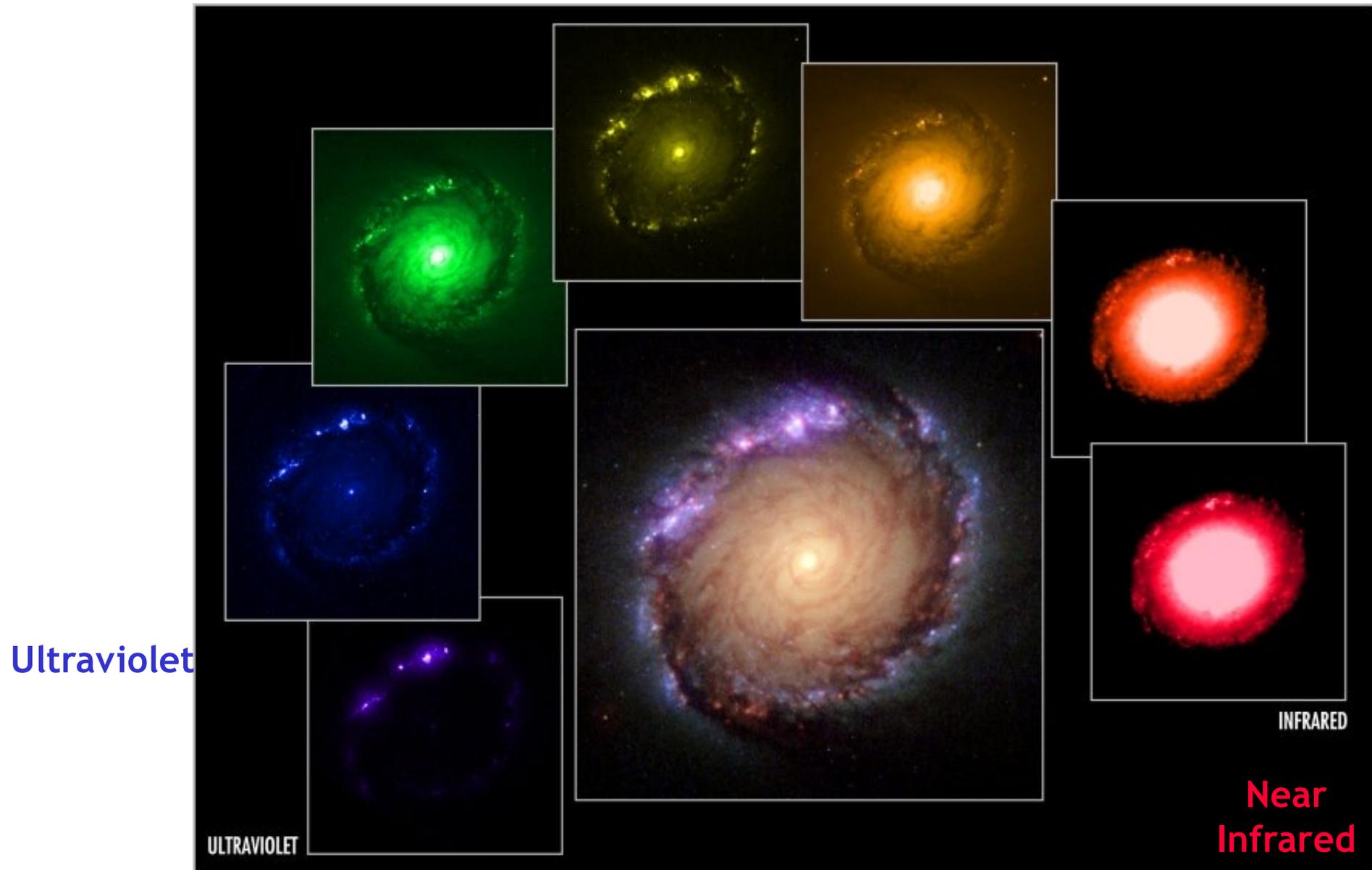
visible vs infrarouge 5



visible vs infrarouge 6

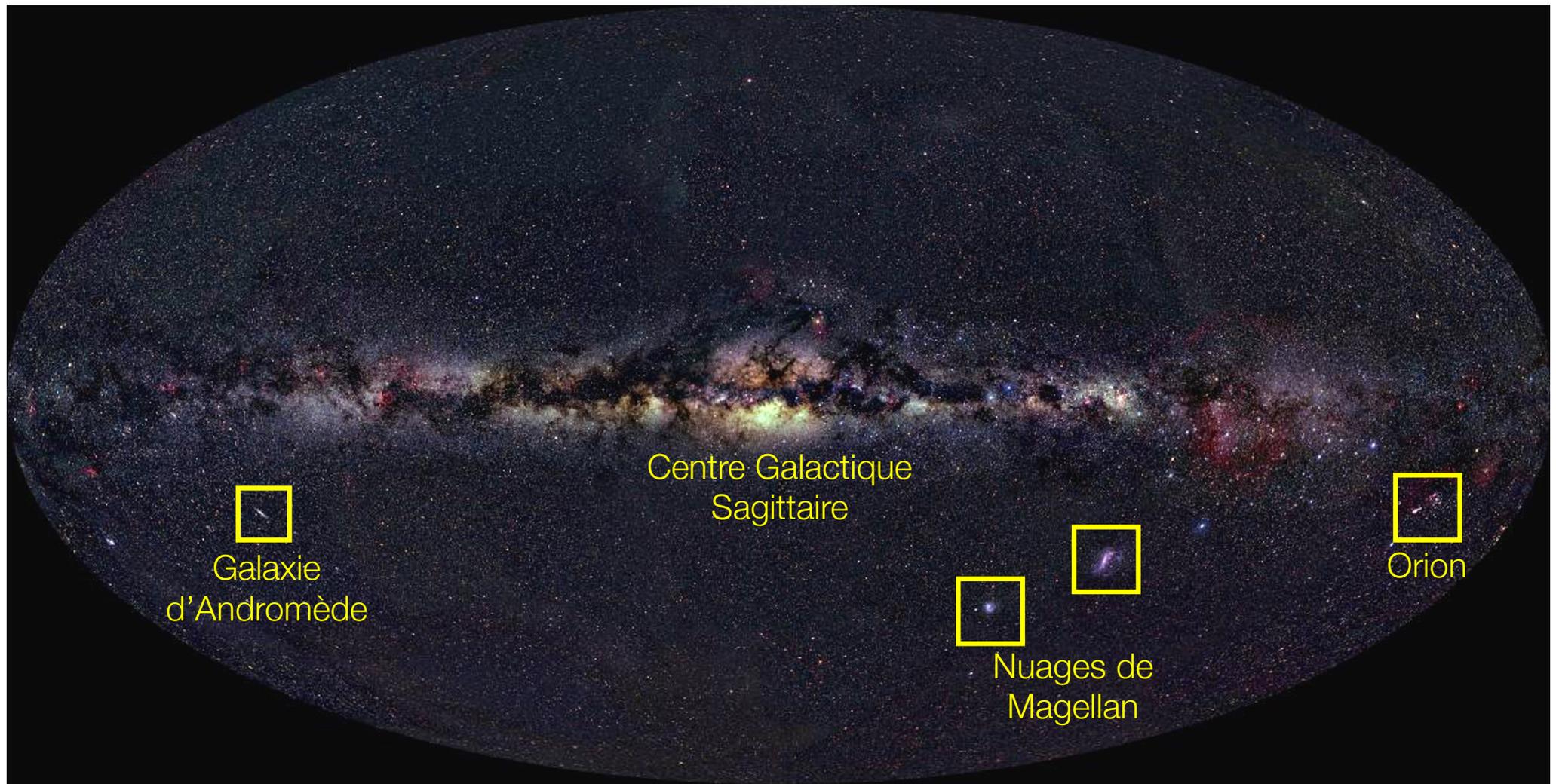


NGC 1512 à plusieurs longueurs d'onde

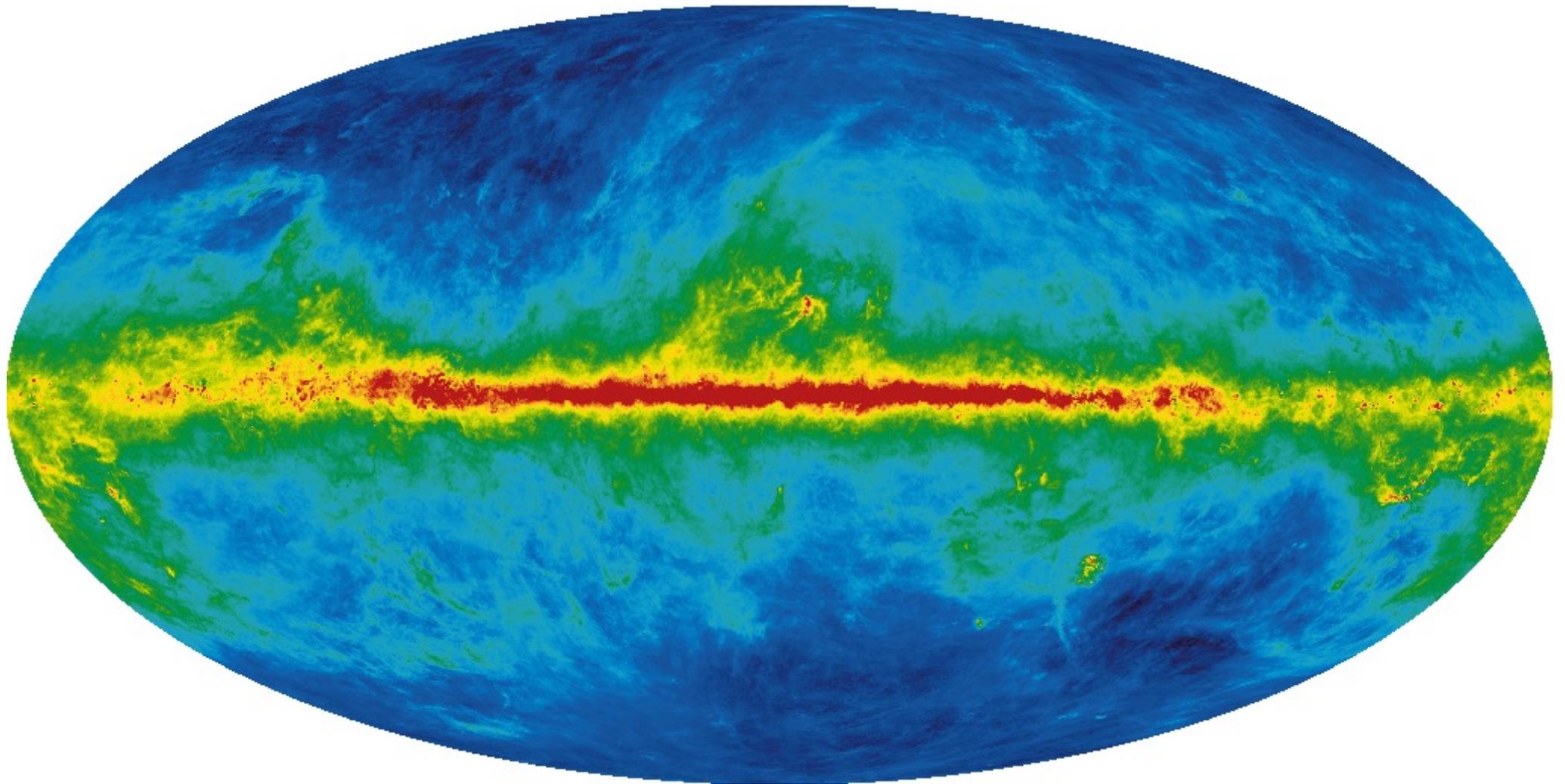


HST NASA/ESA

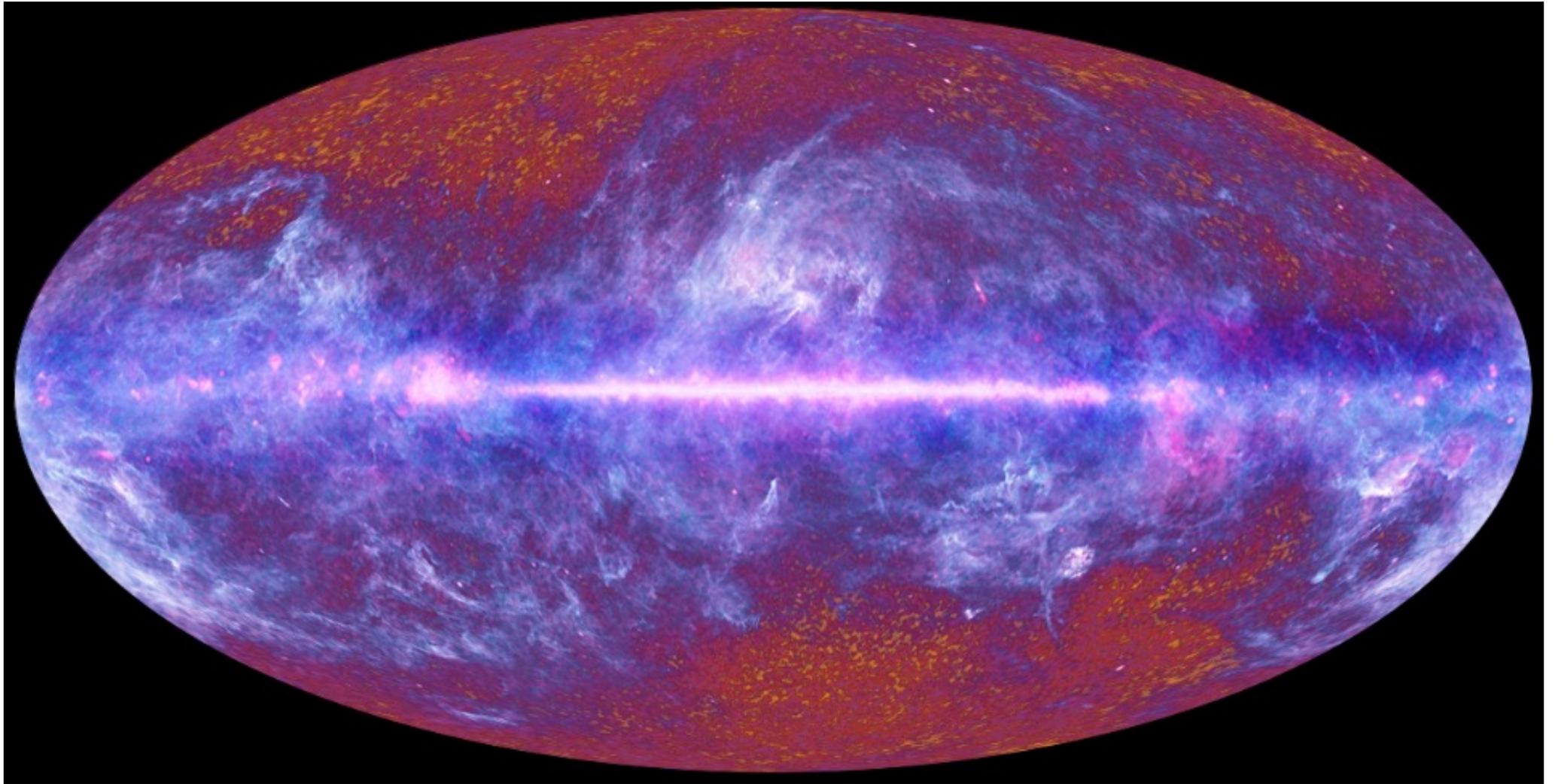
le ciel dans le visible



le ciel en infrarouge



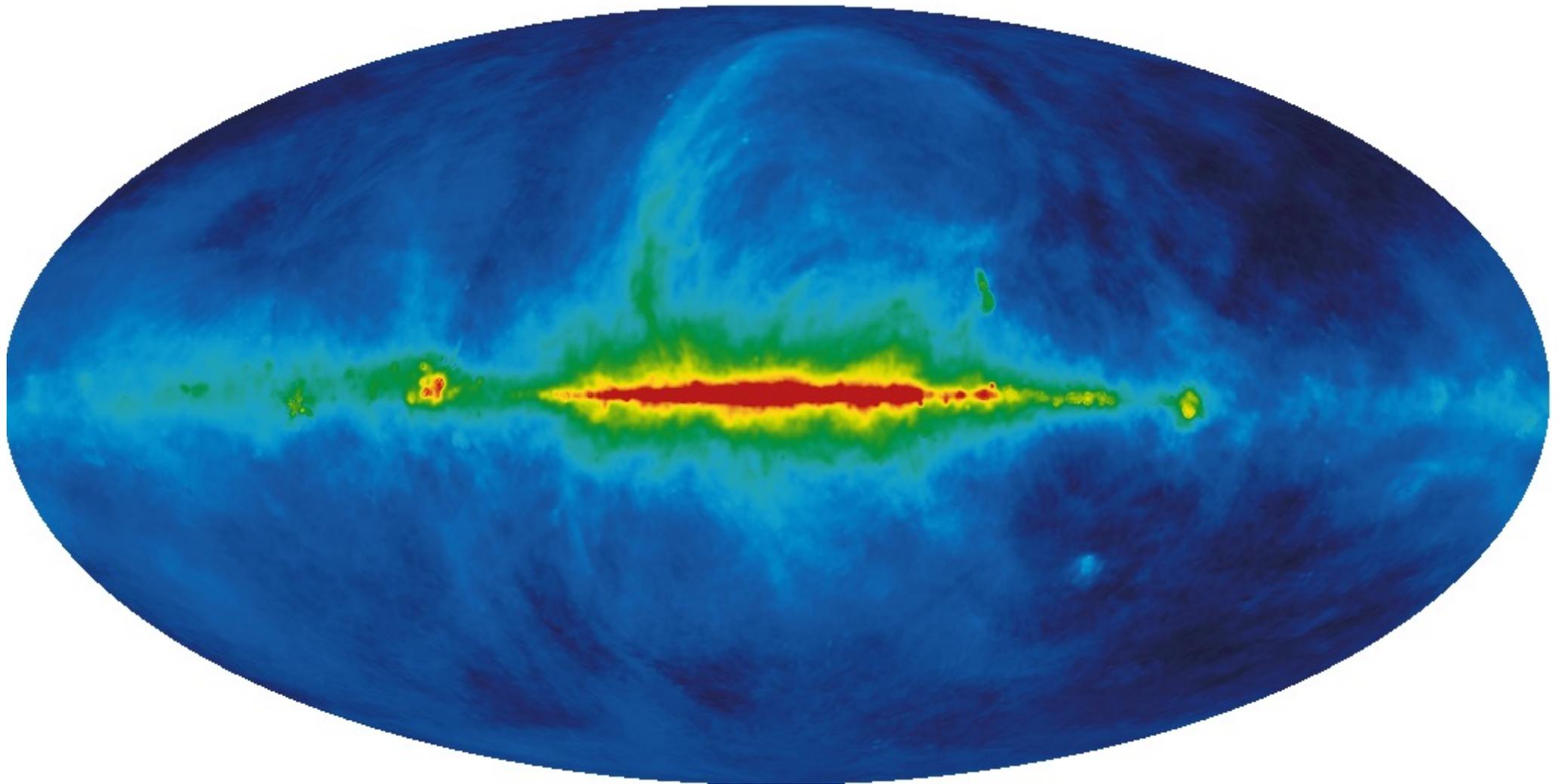
le ciel en micro-ondes [mm]



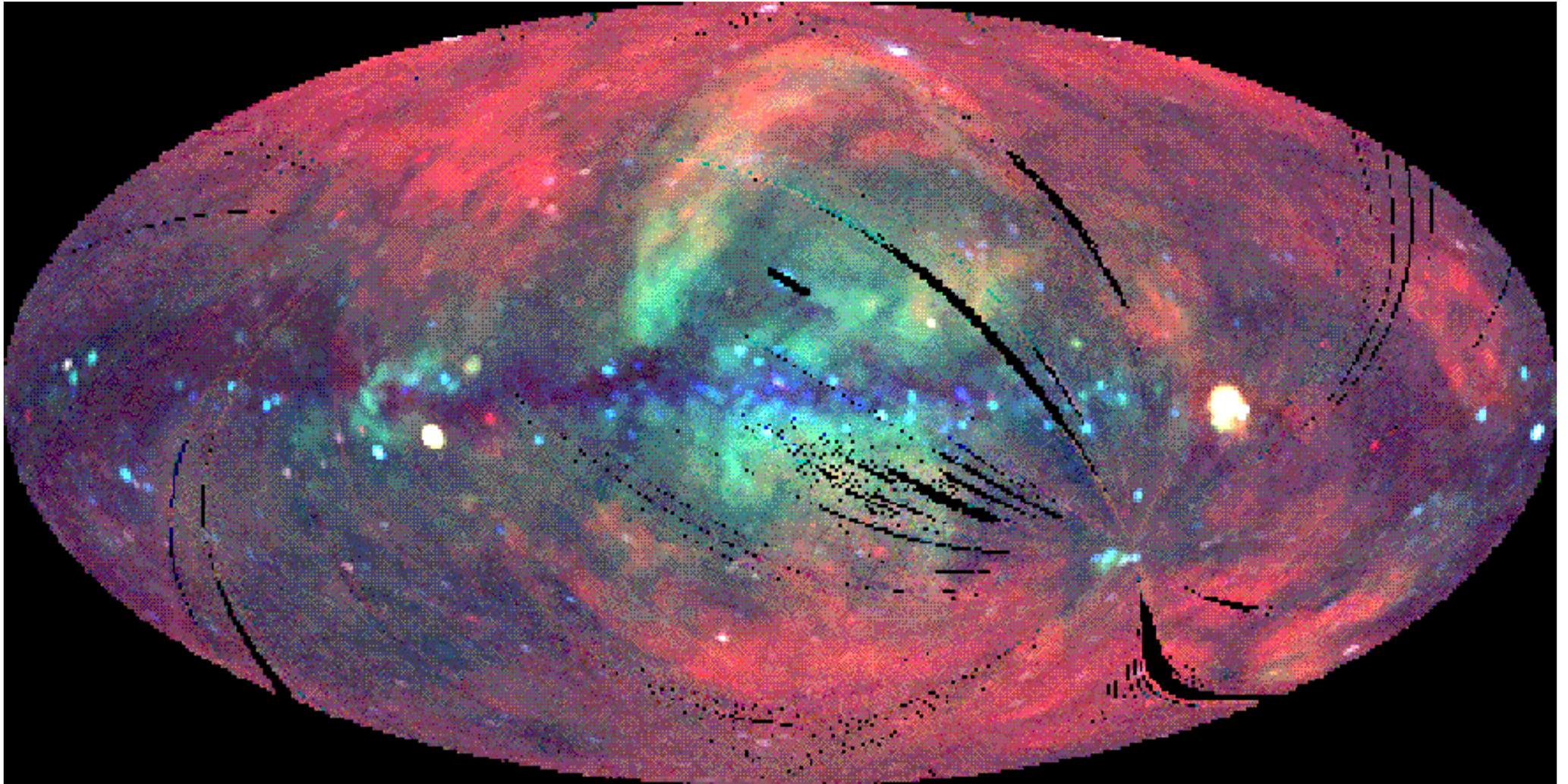
The PLANCK one-year all-sky survey



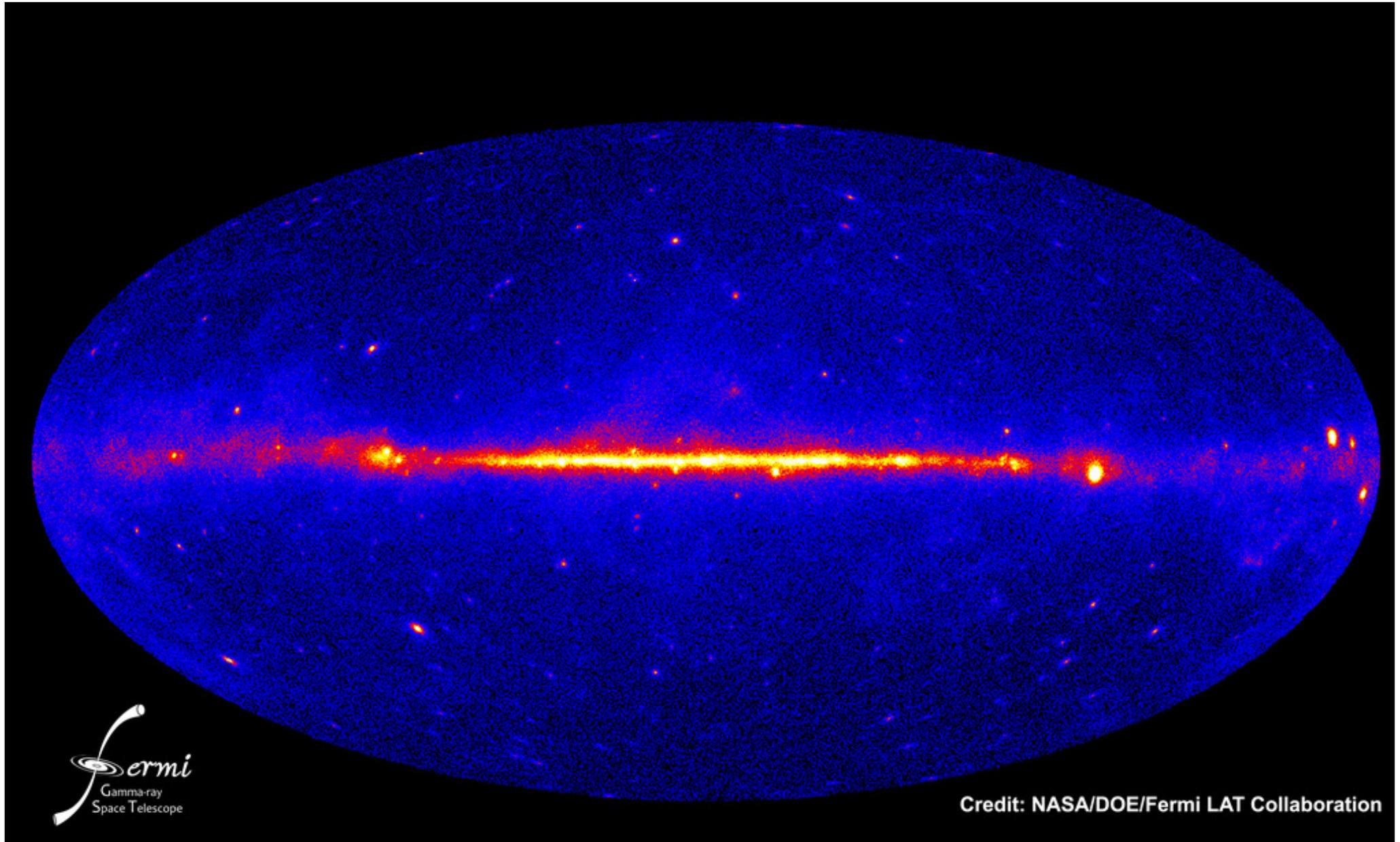
le ciel en ondes radio



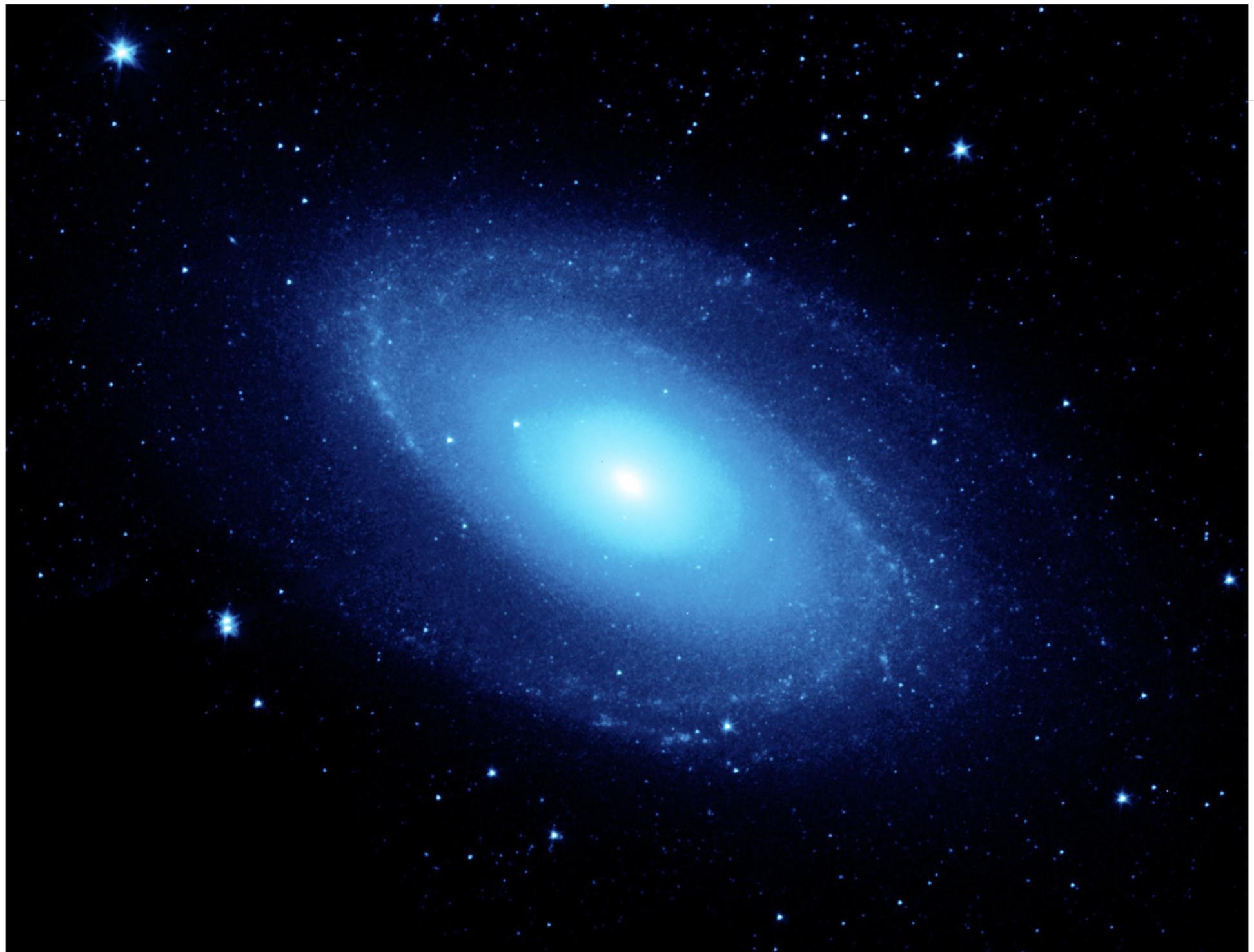
le ciel en rayons X

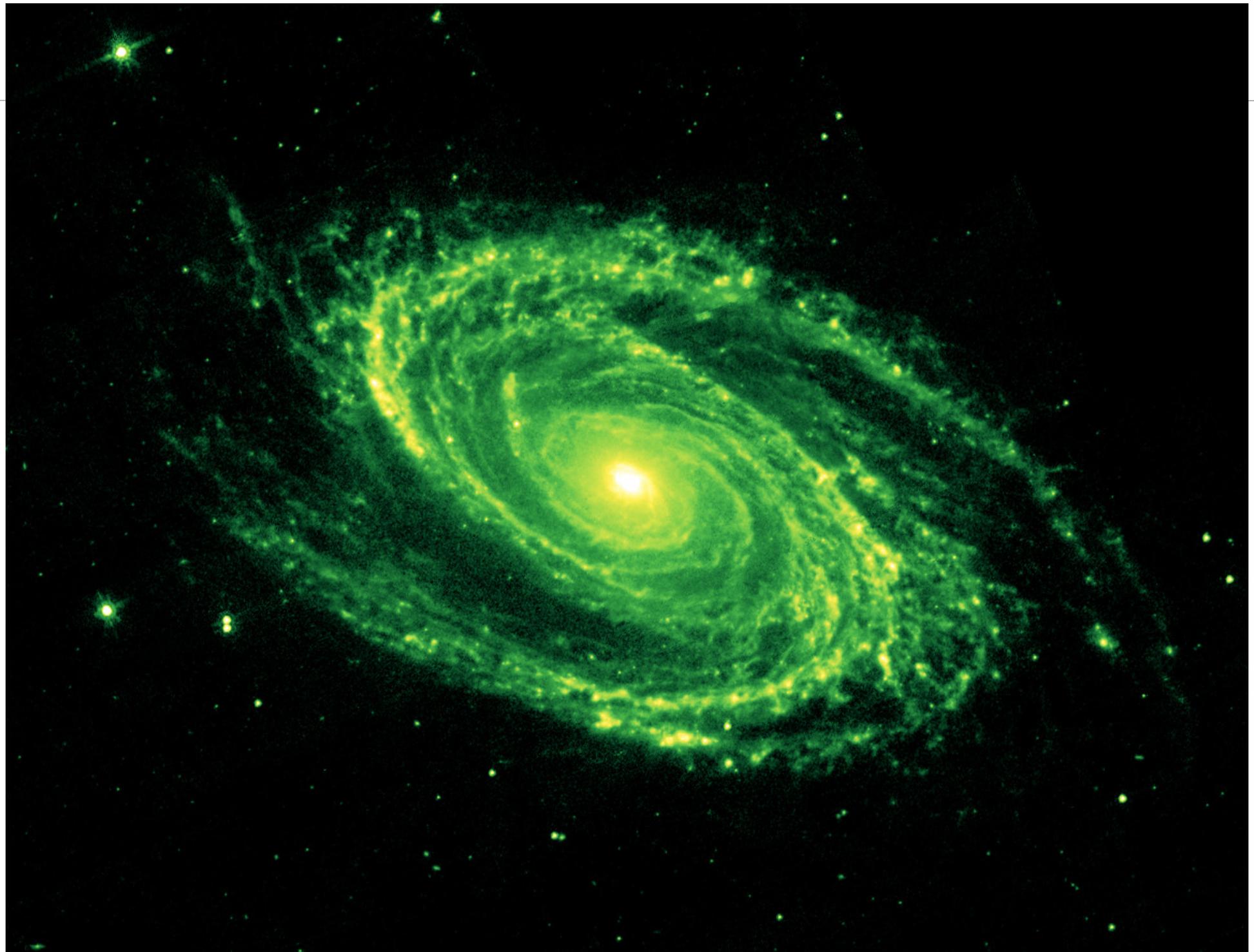


le ciel en rayons gamma





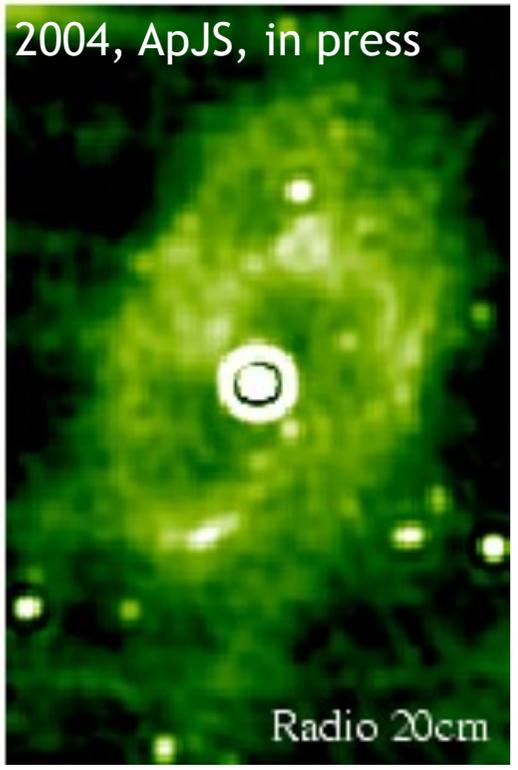
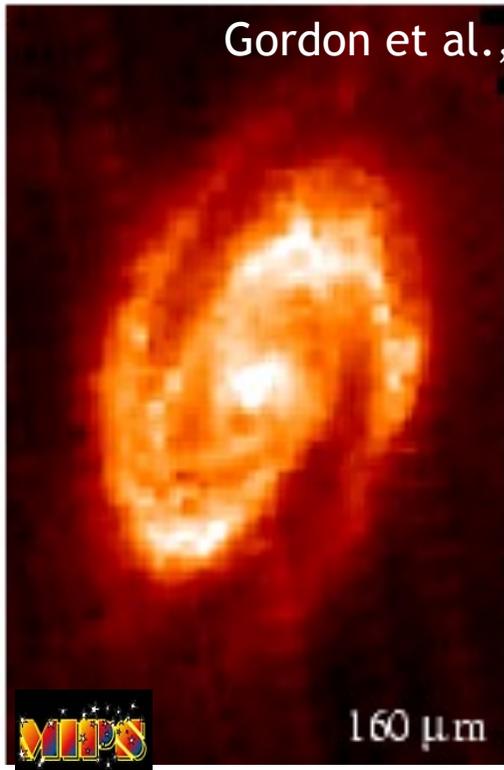
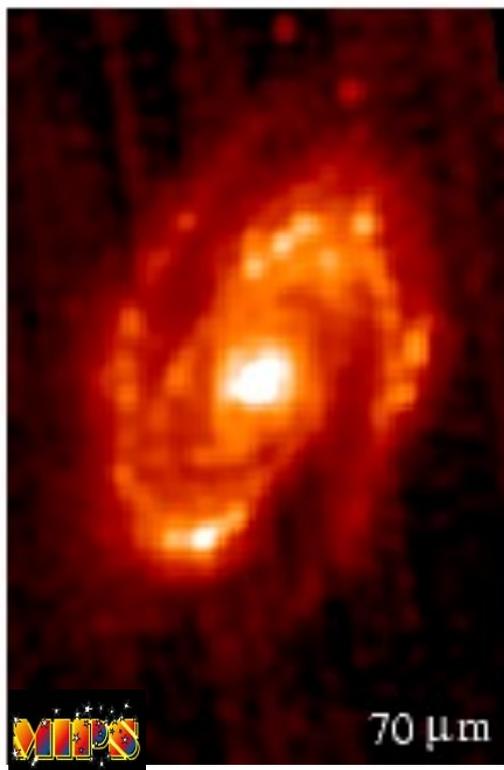
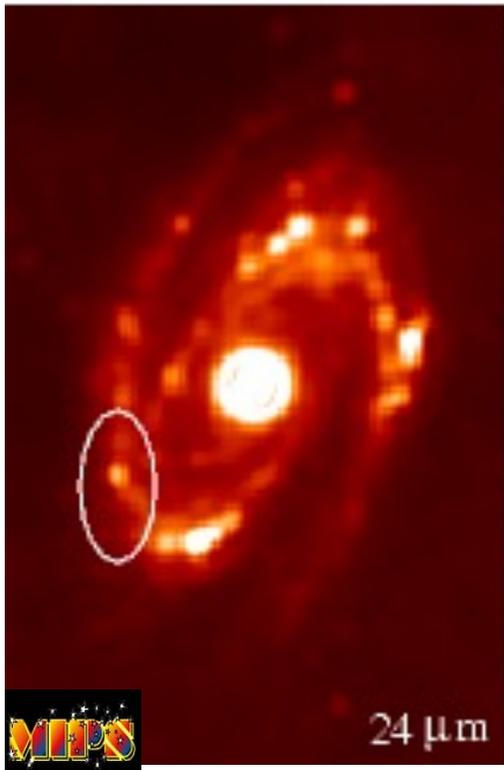
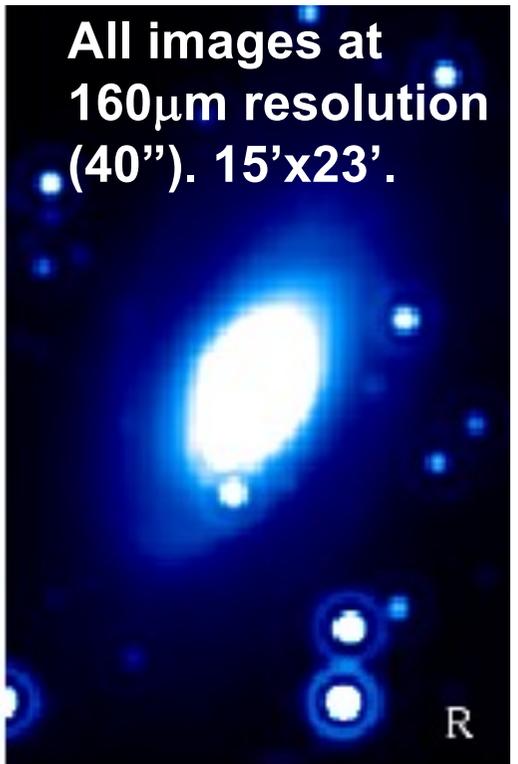
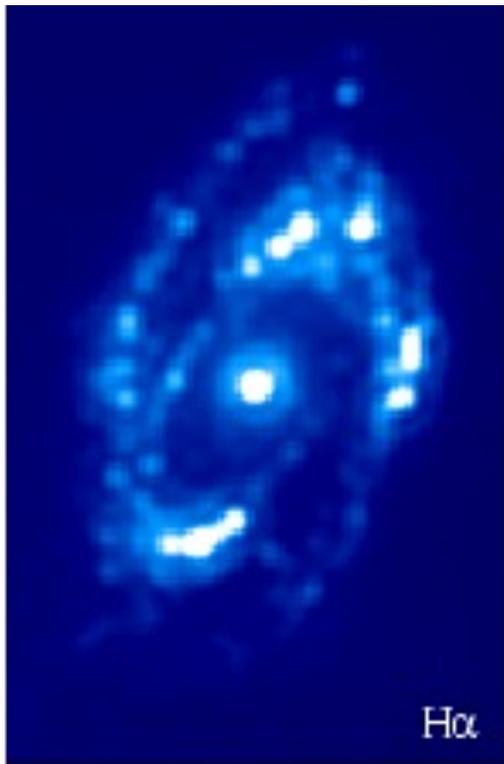
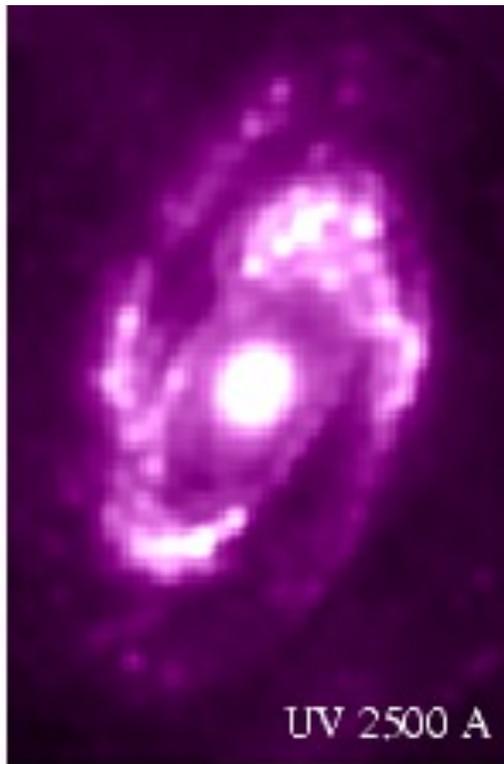
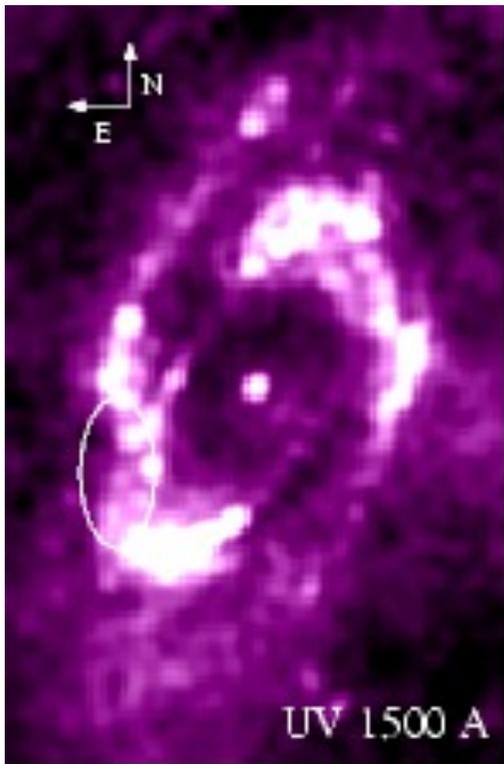












Gordon et al., 2004, ApJS, in press



longueurs d'onde

- Spectre électromagnétique
 - Classé par énergie décroissante = longueur d'onde croissante:
 - Rayons gammas, X
 - Ultraviolet [0.01-0.4 μm]
 - Visible [0.4-0.8 μm]
 - Infrarouge
 - proche [0.8-5 μm], moyen,[5-30 μm], lointain [30-200 μm]
 - Radio
 - Submillimétrique [0.2mm-1mm]
 - Millimétrique [1-10mm]
 - Centimétrique [1-10cm]
 - Etc..



- 1 Connectez-vous sur www.wooclap.com/ASTRO131
- 2 Vous pouvez participer



- 1 Pas encore connecté ? Envoyez [@ASTRO131](https://twitter.com/ASTRO131) au 06 44 60 96 62
- 2 Vous pouvez participer

Pr Hervé Dole



@herve_

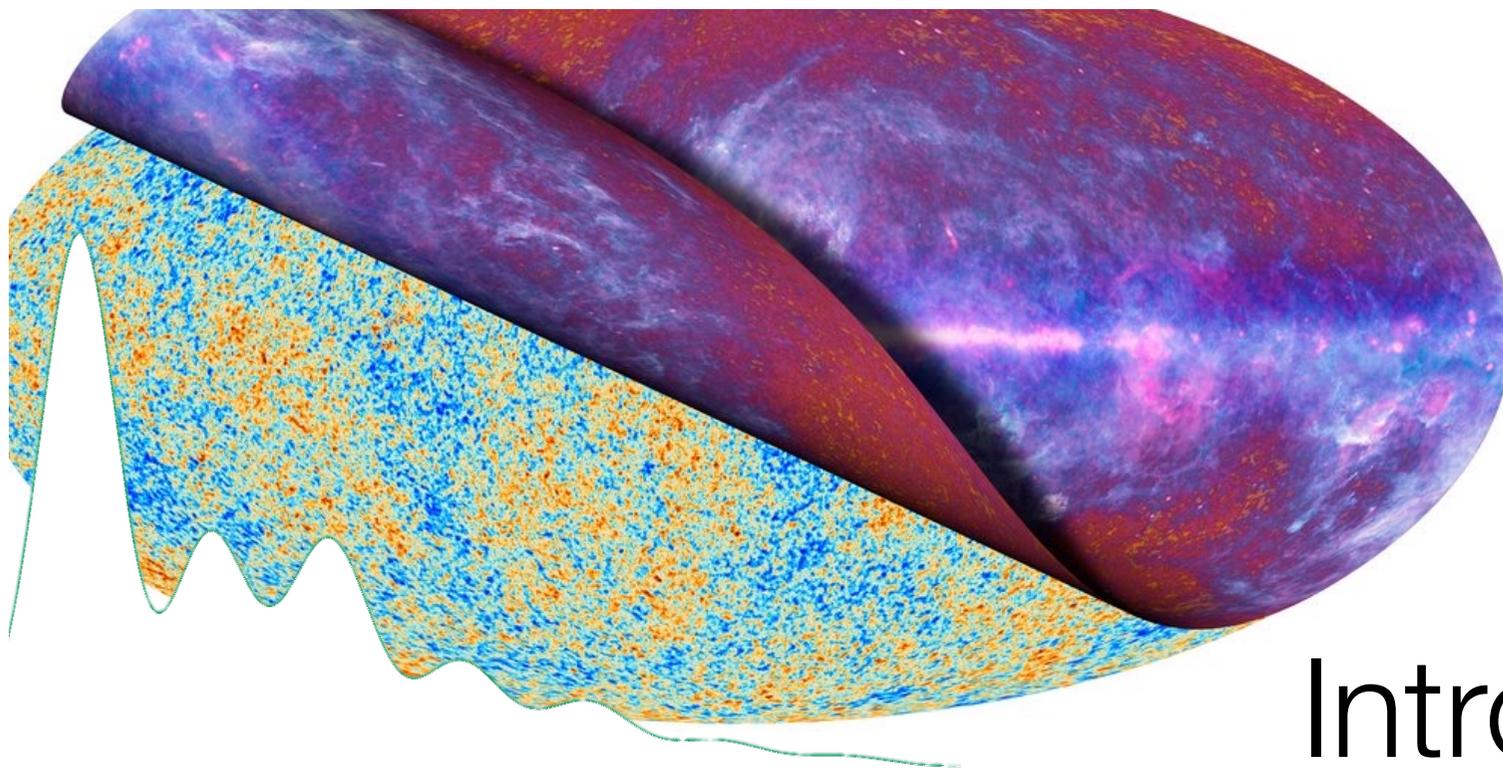
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
Université Paris Sud & CNRS & univ. Paris-Saclay
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131

université
PARIS-SACLAY





Phys131 Introduction, démarche scientifique & un peu de cosmologie

Pr Hervé Dole

 @herve_dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
Université Paris Sud & CNRS & univ. Paris-Saclay
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131





ESA's Juice mission

@ESA_JUICE

📸 Captured on camera!

🌍 These two little marbles we call our cosmic home were photographed by Juice from over 5 million km, as the spacecraft waved us goodbye while heading towards Venus.

The images were taken using different exposure times as part of inflight tests and calibrations of Juice's monitoring cameras.

😎 One oversaturated image brought to light a photobomber: planet Uranus, which was 2.9 billion km away from Juice. Can you spot which dot is the planet? 🤔



3. astrophysique: postulats

- l'Univers est intelligible
 - malgré le fait qu'il soit constitué de la somme de ses constituants, peu ou pas compris individuellement
- les lois de la physique
 - sont valables partout et tout le temps
- Principe cosmologique
 - l'univers est homogène+isotrope a une certaine échelle (grande)
 - aucun lieu n'est privilégié dans le cosmos

3. astrophysique

une définition de l'astrophysique

- étude physique des objets célestes, de leurs propriétés, structure et évolution
- science pluridisciplinaire, basée sur la physique
- objets célestes incluent par exemple:
 - l'Univers dans son ensemble -> cosmologie
 - les types de galaxies -> extragalactique
 - les (exo-)planètes -> sciences planétaires
 - la chimie du milieu interstellaire -> astrochimie
 - les processus chimiques prébiotiques -> astrochimie

A faire avant la prochaine séance [Phys131] Astrophysique

Corrigé oral du quiz maison

Que montre l'expérience de l'astrologue-magicien quand il tente de prouver que la Terre ne tourne pas sur elle-même ? (vidéo: 01m20s)

Quelles conditions permettent une meilleure compréhension de l'Univers ? (vidéo: 03m20s)

Quel est l'âge de l'Univers ? (vidéo; 04m20s)

Quel(s) élément(s) chimique(s) est (sont) synthétisé(s) durant les 3 premières minutes de l'Univers ? (vidéo: 05m00s)

Le fond cosmologique (lumière relique du Big Bang) a été relâchée dans l'Univers (vidéo: 05m40s)

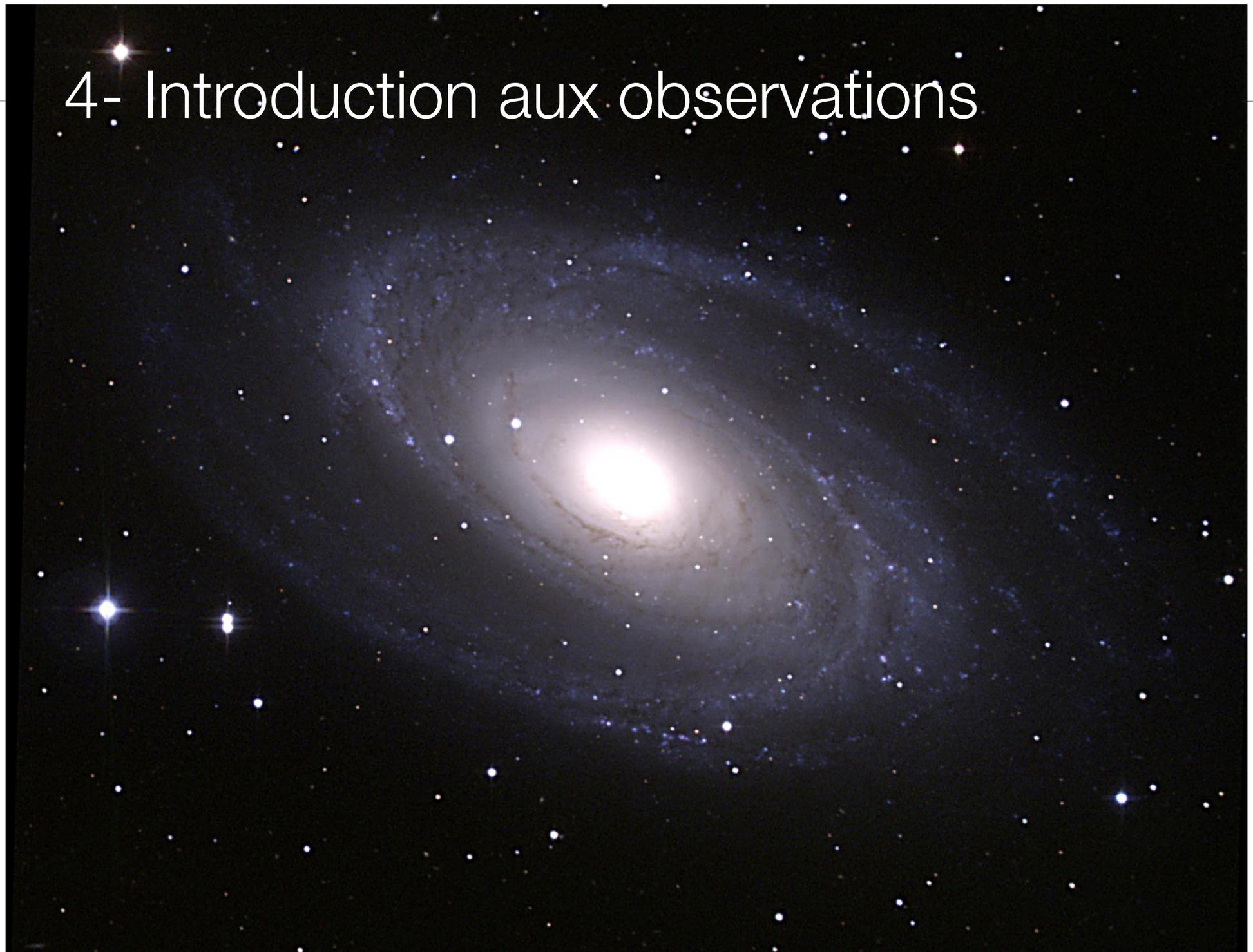
L'univers aujourd'hui est: (vidéo: 07m40s)

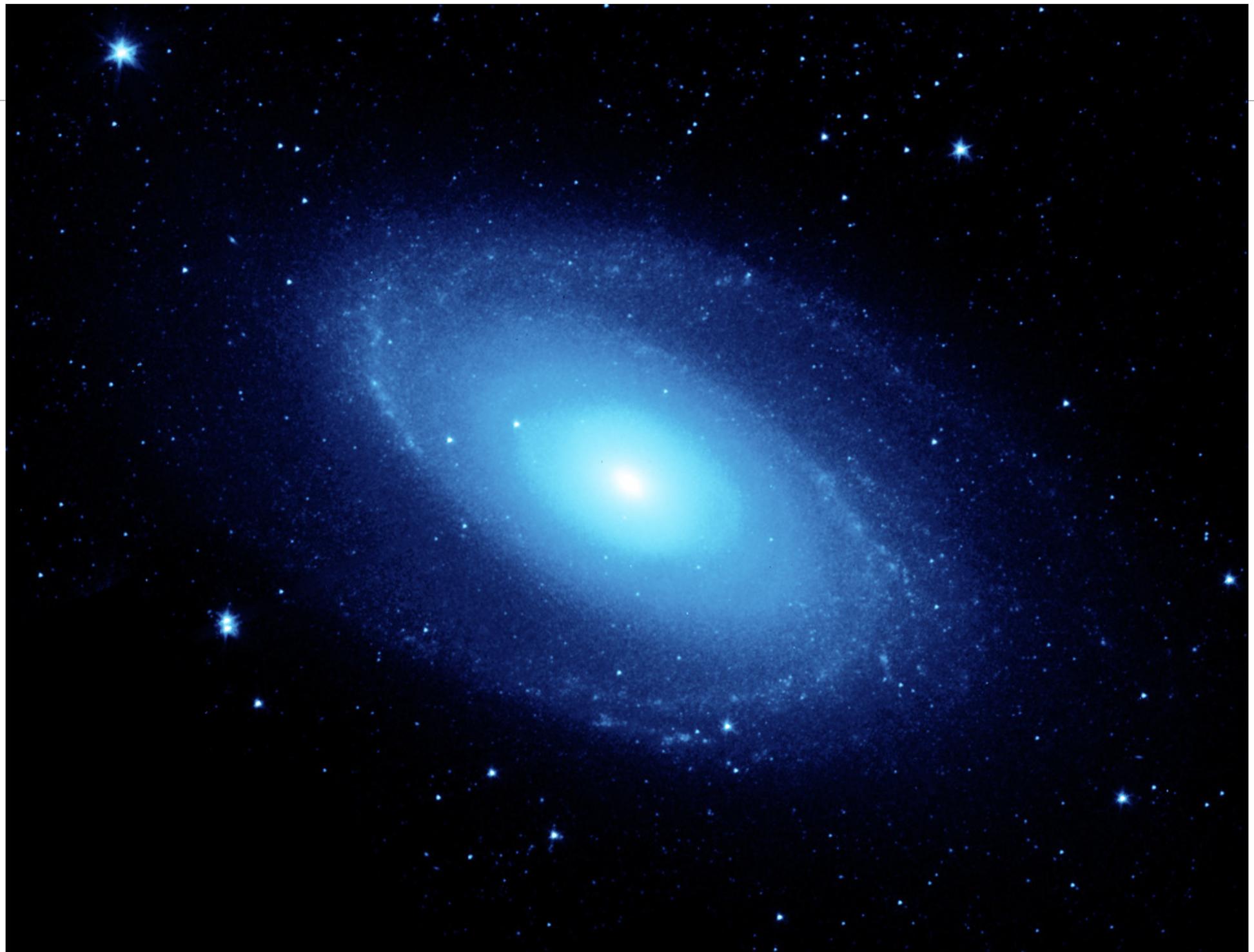
La composition de l'univers, à l'échelle du système solaire, est environ: (vidéo: 11m00s)

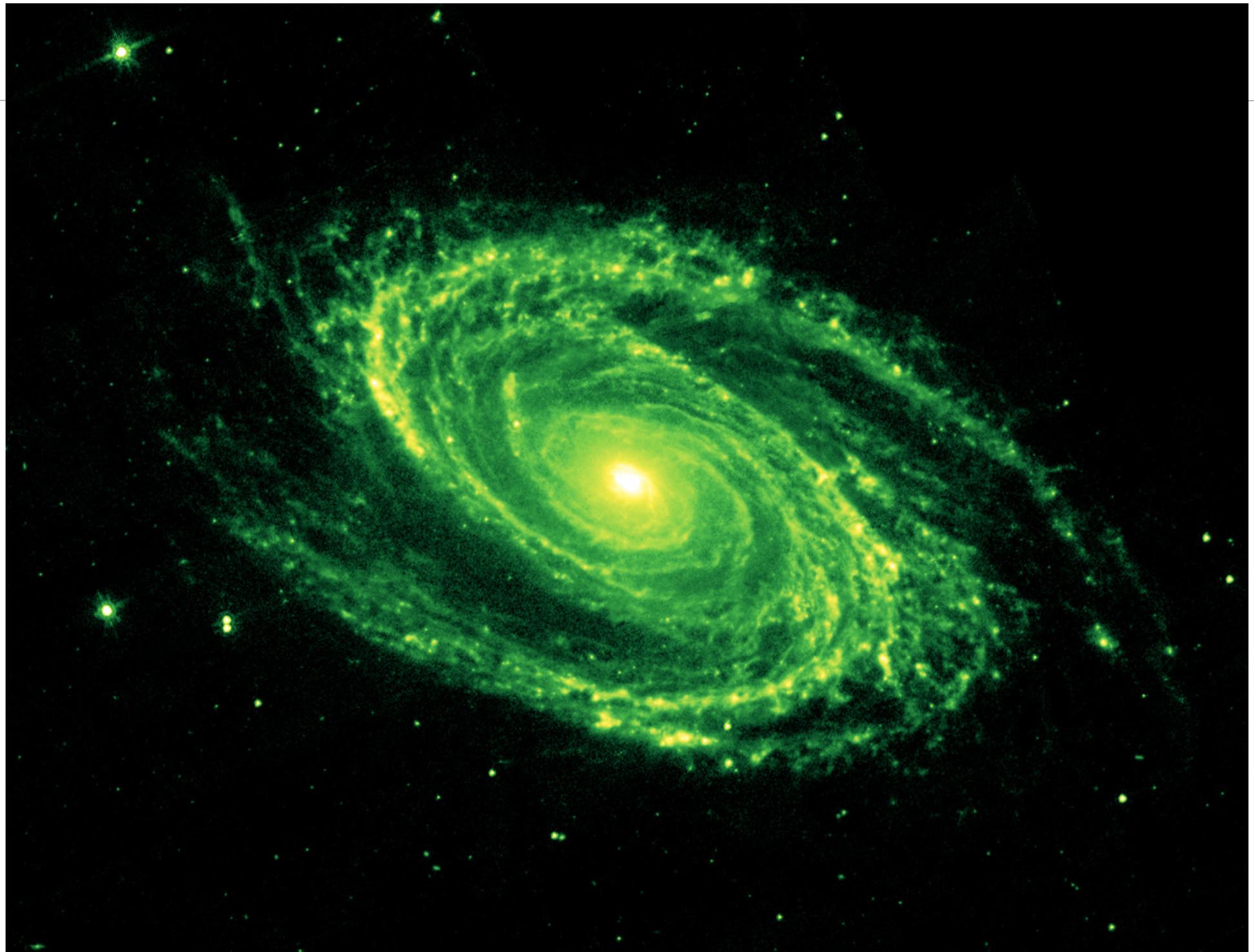
La composition de l'univers, à l'échelle de tout l'Univers, est environ: (vidéo: 11m00s)

Classer du plus petit (en haut) au plus grand (en bas): la taille des détecteurs des caméras spatiales (vidéo: 17m00s)

4- Introduction aux observations



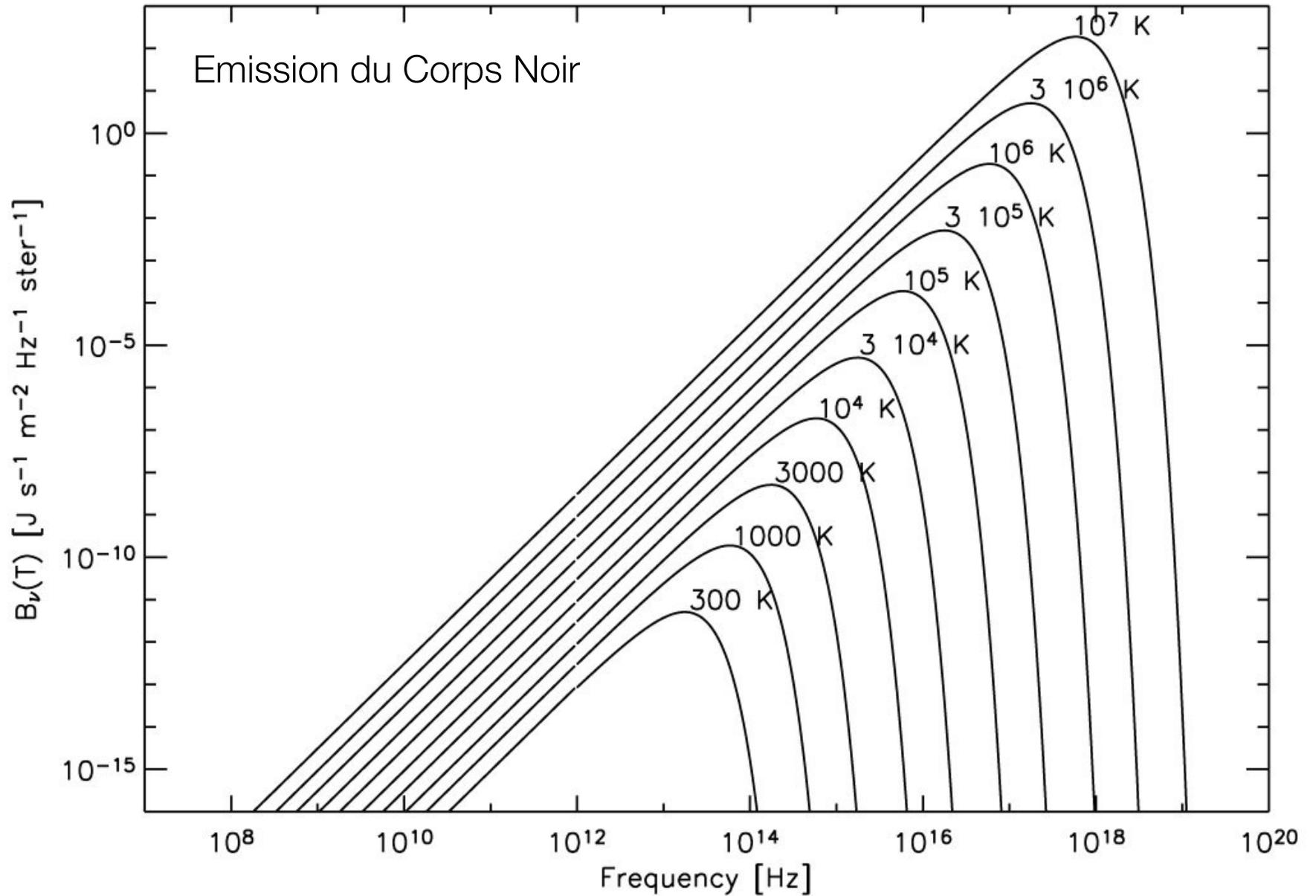








4- Emission vs Temperature: loi de Wien



5 Galaxies et Hubble et Lemaître



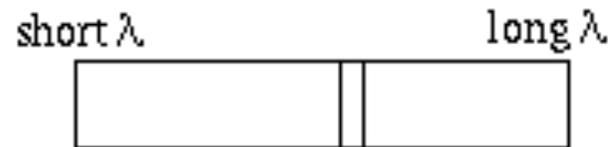
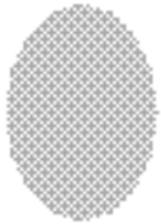
Edwin Hubble en 1949, au Schmidt de 48' du Mt Palomar

- Avant 1915
 - La nature des galaxies n'était pas comprise
 - Leurs distances inconnues
- Dans les années 20
 - E. Hubble prend des spectres de galaxies
 - G. Lemaître établit le modèle

Spectres de Galaxies

Taille Galaxie

Spectre



more distant galaxy has greater doppler shift

On définit le “décalage vers le rouge” ou **redshift** z par:

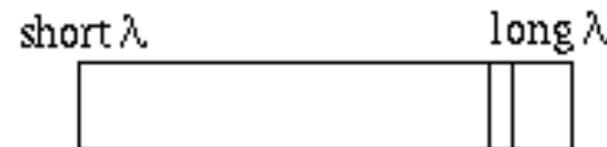
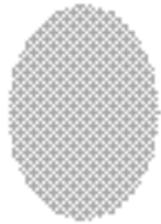
$$z = [\lambda_{\text{recu}} - \lambda_{\text{émis}}] / \lambda_{\text{émis}}$$
$$= \lambda_{\text{recu}} / \lambda_{\text{émis}} - 1$$

Loi de Hubble-Lemaître

Taille Galaxie

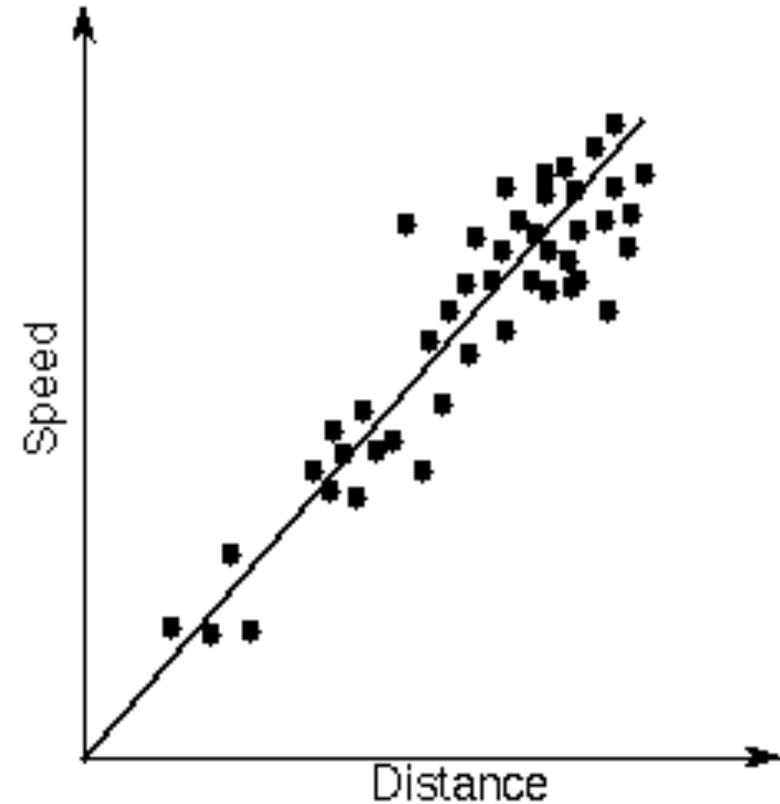
Spectre

Loi de Hubble-Lemaître



more distant galaxy has greater doppler shift

Hubble Law
recession speed = $H_0 \times \text{distance}$



Vote: C3

Loi de Hubble-Lemaître

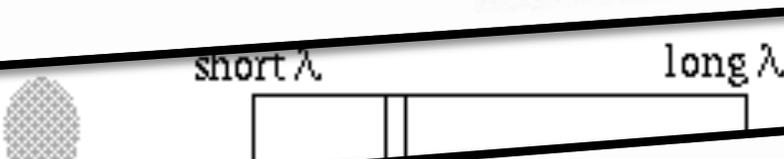
Taille Galaxie

Spectre

Loi de Hubble-Lemaître

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES
Note de M. l'Abbé G. LEMAITRE
1927

short λ long λ



A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE
By EDWIN HUBBLE
MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON
Communicated January 17, 1929
1929

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-
more distant galaxy has greater doppler shift

Distance



TD: loi de Hubble-Lemaître

Énoncé: A3

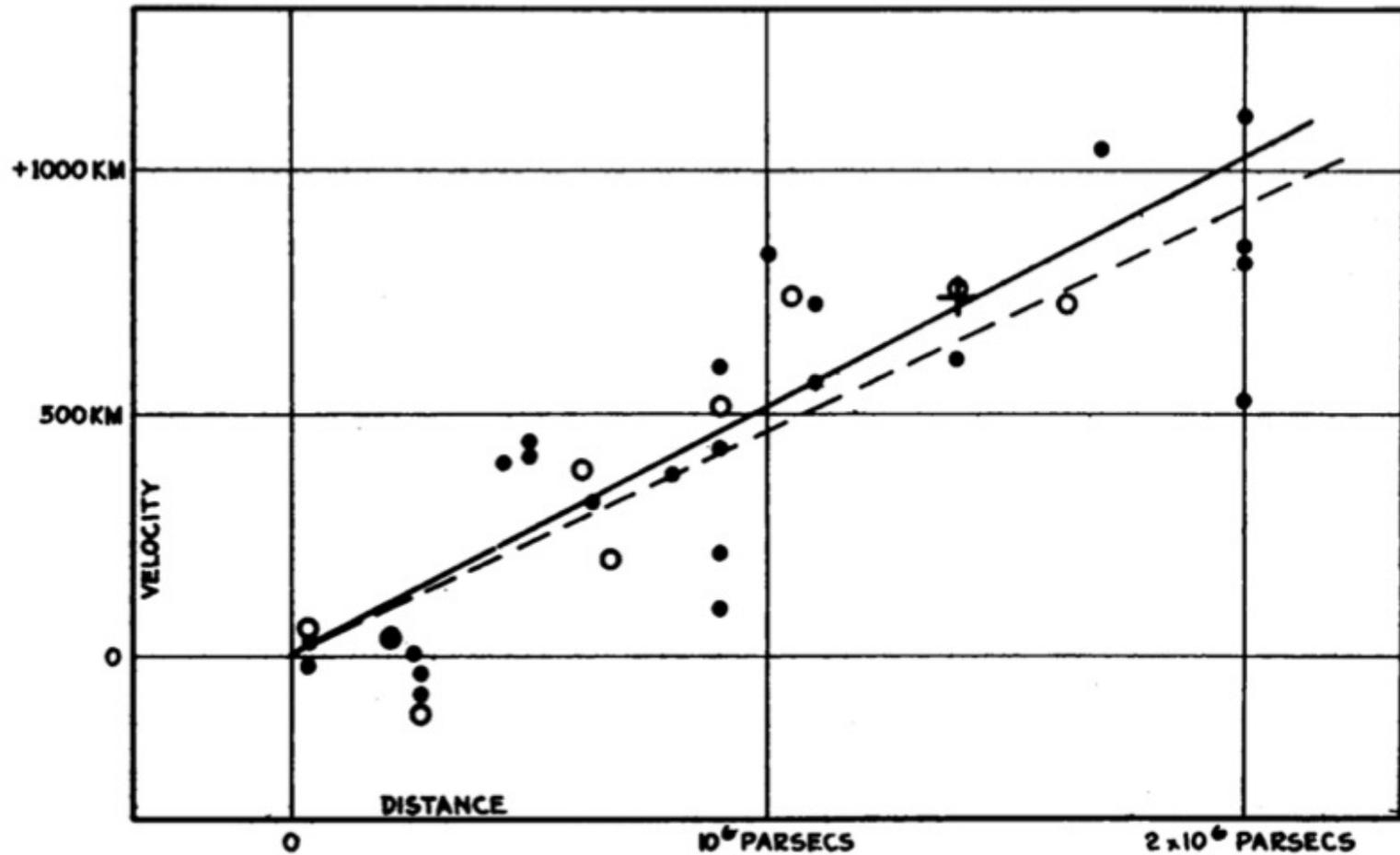


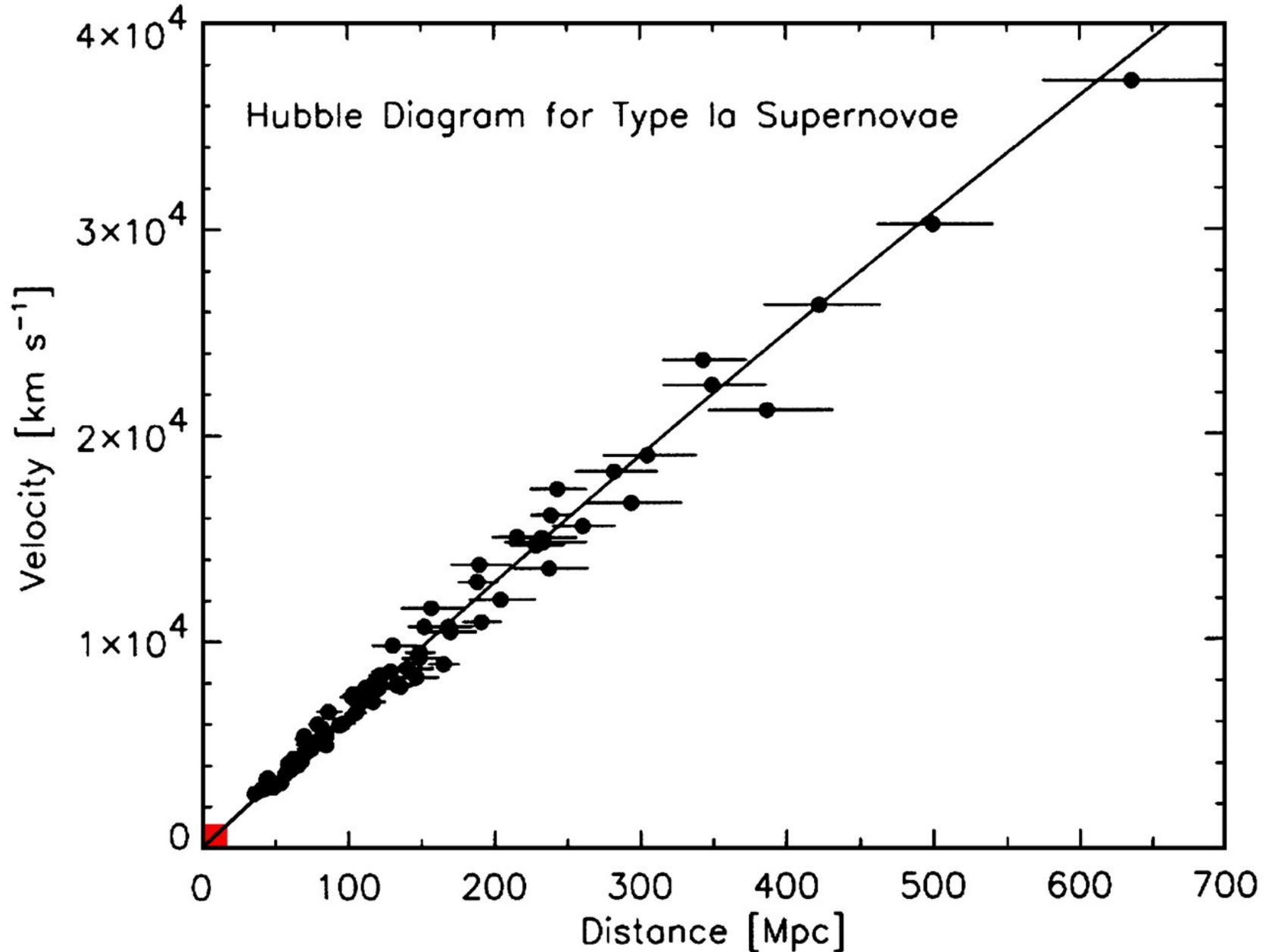
FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

*Diagramme de la découverte de l'expansion de l'univers réalisé par Hubble en 1929
(tiré de Proc. Nat. Astron. Soc., vol. 15, p. 168, 1929)*

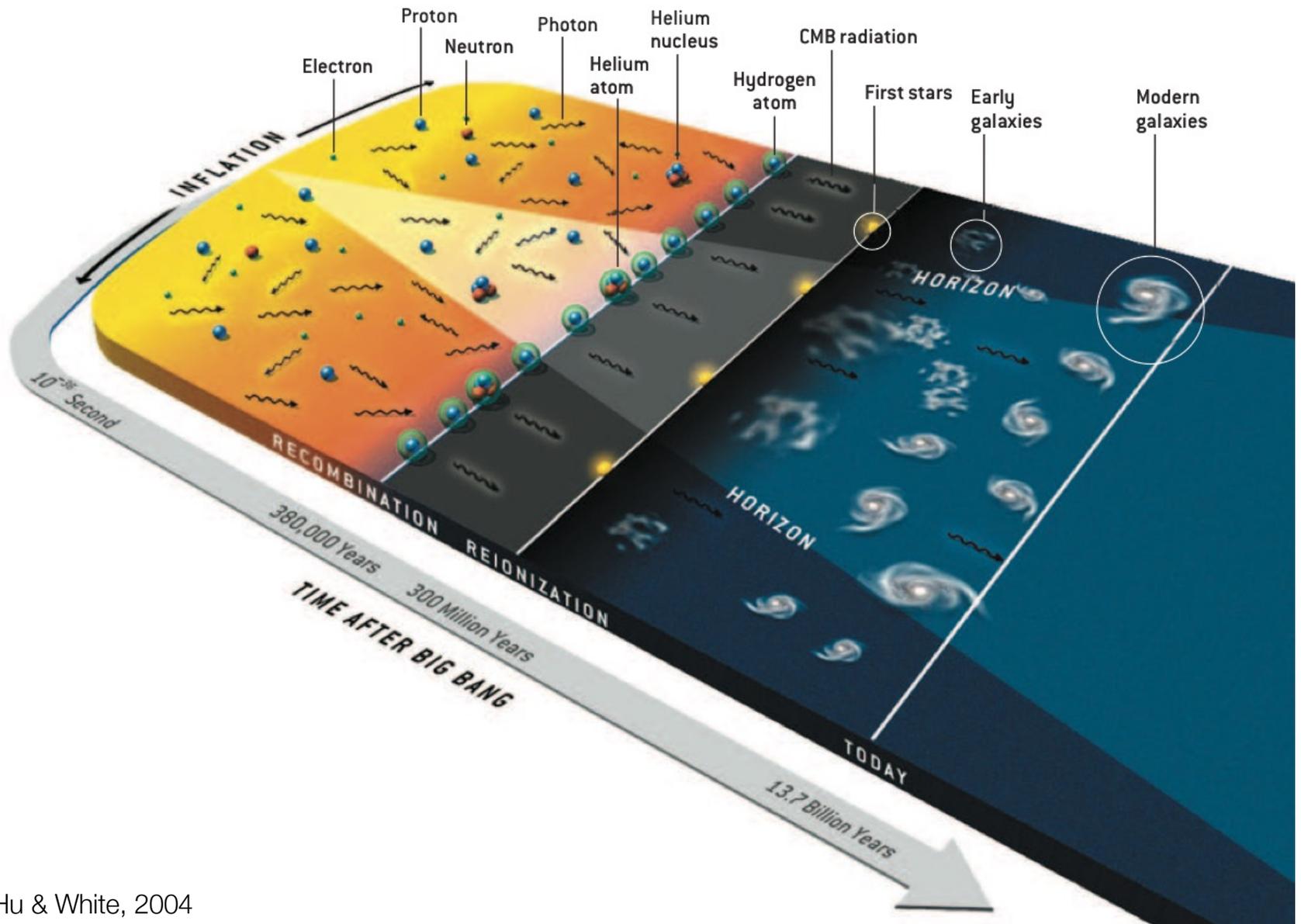
TD: loi de Hubble-Lemaître

Énoncé: A3



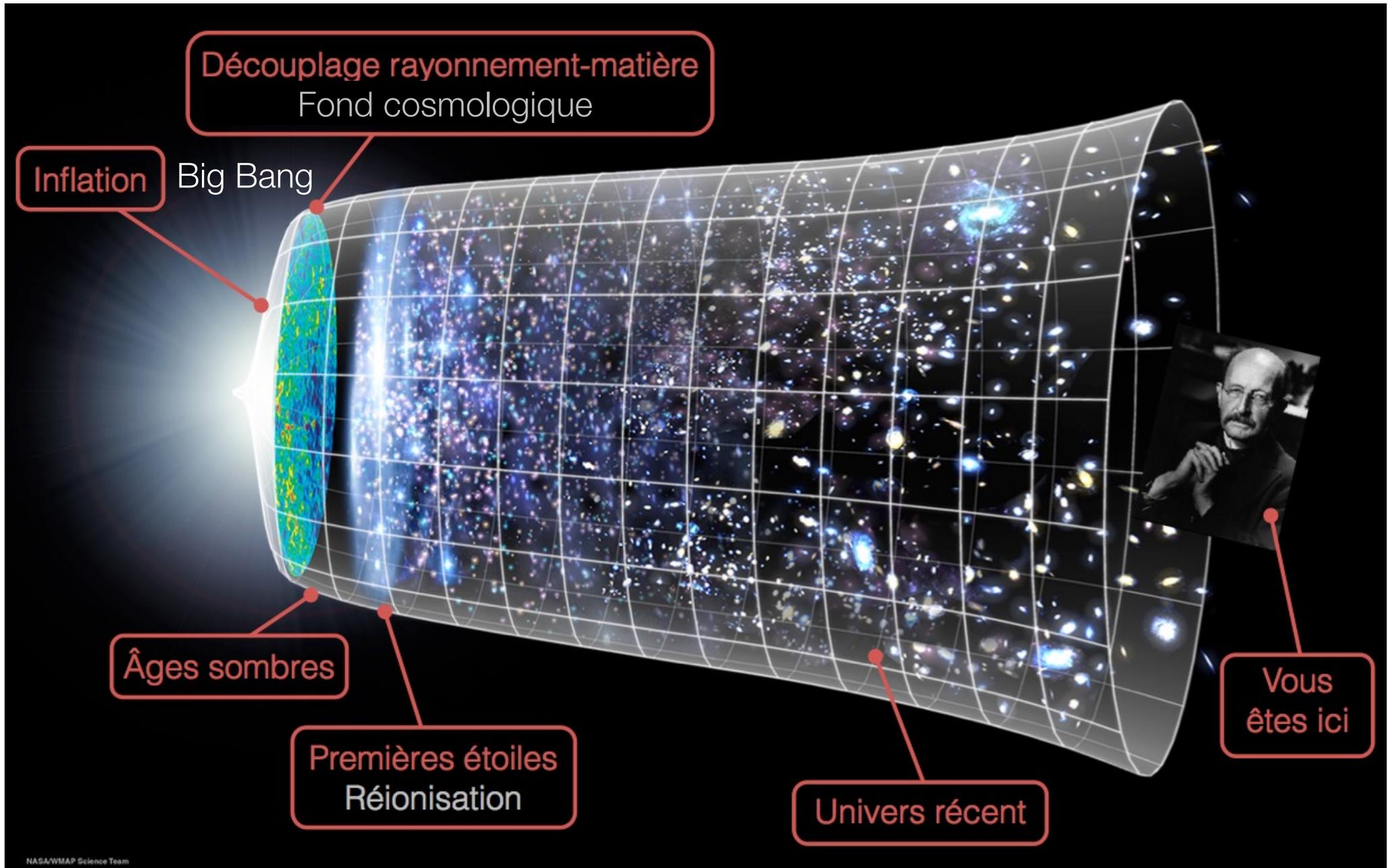
redshifts

6. history of the universe



Hu & White, 2004

Univers: 13.8 milliards d'années d'histoire



7 La controverse de la nucléosynthèse

■ Steady state model

- *Bondi, Hermann; Gold, Thomas (1948). "The Steady-State Theory of the Expanding Universe". MNRAS, 108: 252.*
- *Hoyle, Fred (1948). "A New Model for the Expanding Universe". MNRAS, 108: 372.*
- *Burbidge, E. M.; Burbidge, G. R.; Fowler, W. A.; Hoyle, F. (1957). "Synthesis of the Elements in Stars". Reviews of Modern Physics, 29 (4): 547–650.*

■ Big Bang chaud

- *Alpher, R. A.; Bethe, H.; Gamow, G. (1 April 1948). "The Origin of Chemical Elements". Physical Review. 73 (7): 803–804.*

(surnommé α, β, γ)

8. Les 3 piliers de la cosmologie moderne



1 Connectez-vous sur www.wooclap.com/ASTRO131

2 Vous pouvez participer



1 Pas encore connecté ? Envoyez [@ASTRO131](https://twitter.com/ASTRO131) au 06 44 60 96 62

2 Vous pouvez participer

Pr Hervé Dole



@herve_

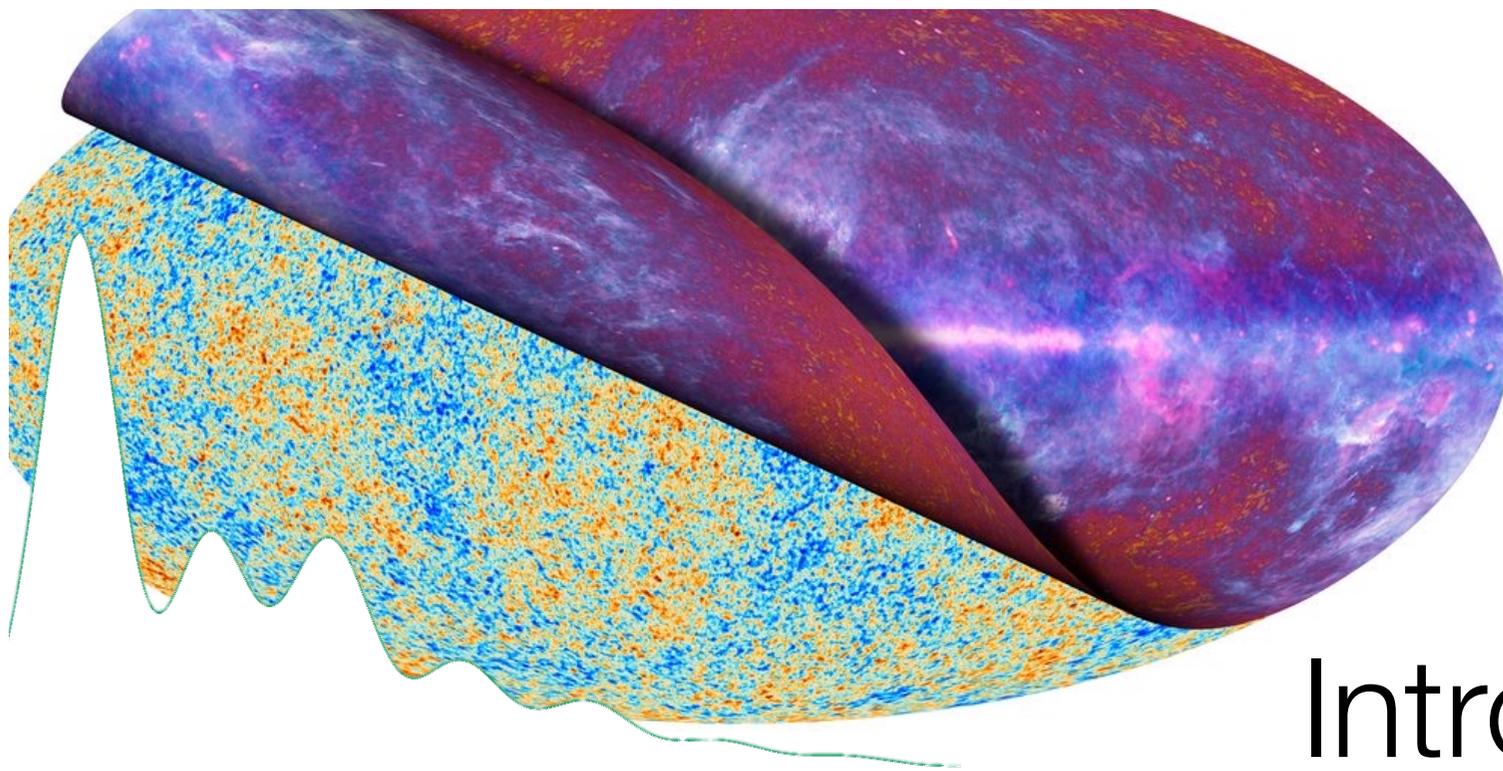
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
Université Paris Sud & CNRS & univ. Paris-Saclay
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131

université
PARIS-SACLAY





Phys131 Introduction, démarche scientifique & un peu de cosmologie

Pr Hervé Dole

 @herve_dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
Université Paris Sud & CNRS & univ. Paris-Saclay
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

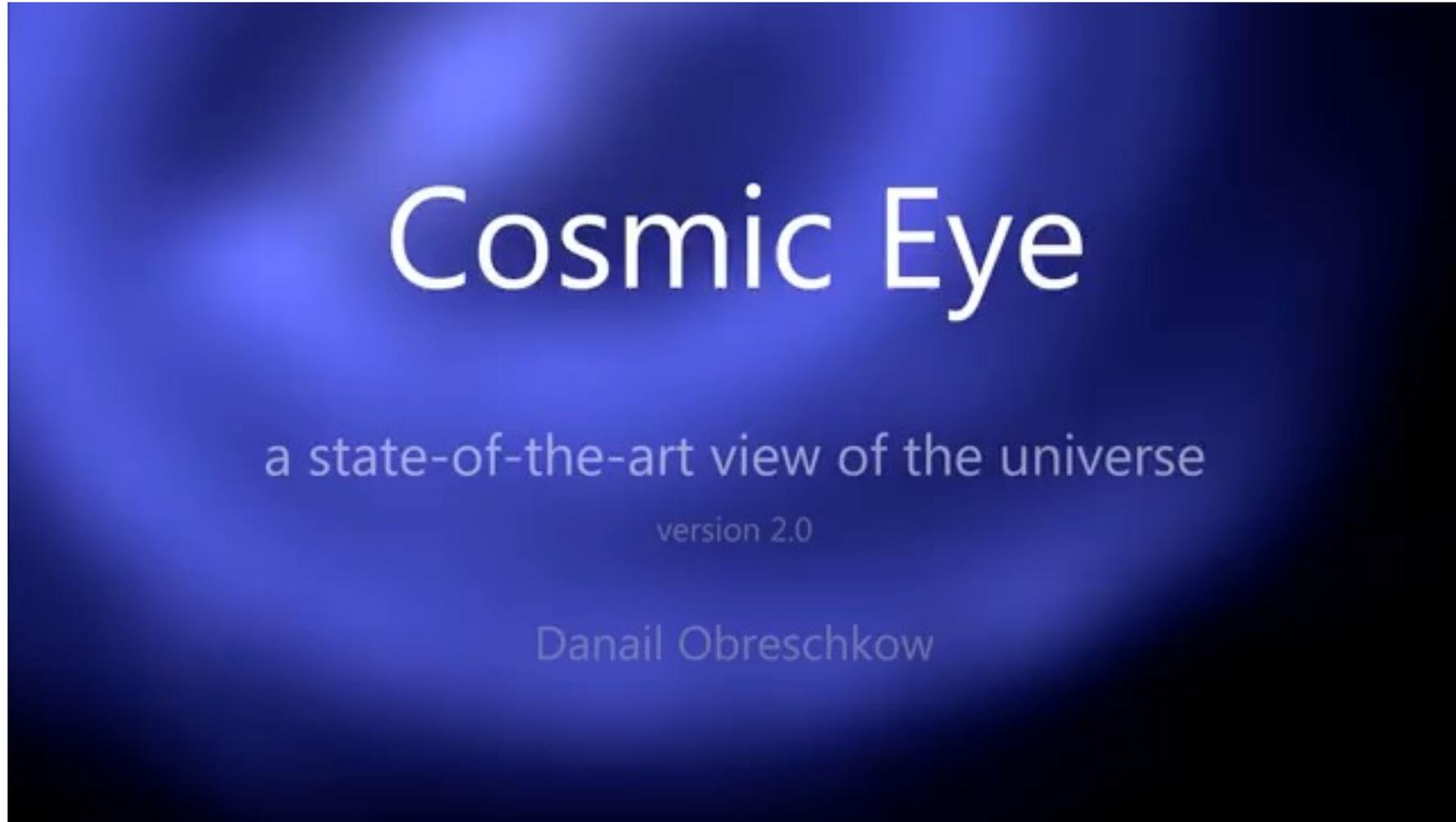
2024-2025 université Paris-Saclay

Hervé Dole, IAS - Phys131



3 minutes d'exploration des échelles de l'Univers

<https://youtu.be/8Are9dDbW24>



9. Gravité, galaxies, matière noire

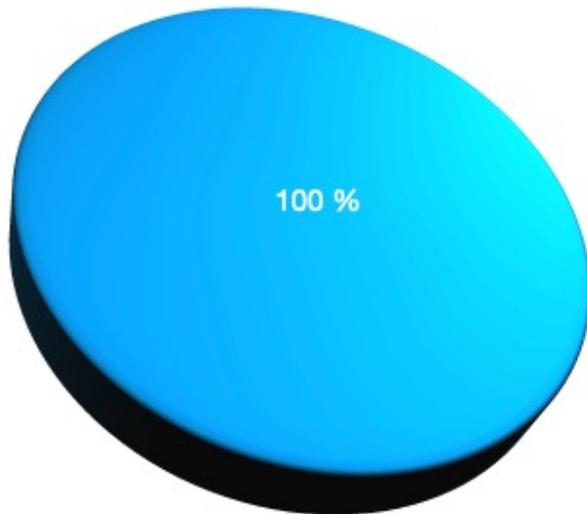
a-t-on besoin de matière noire ?

contenu (densité d'énergie) en fonction de l'échelle spatiale



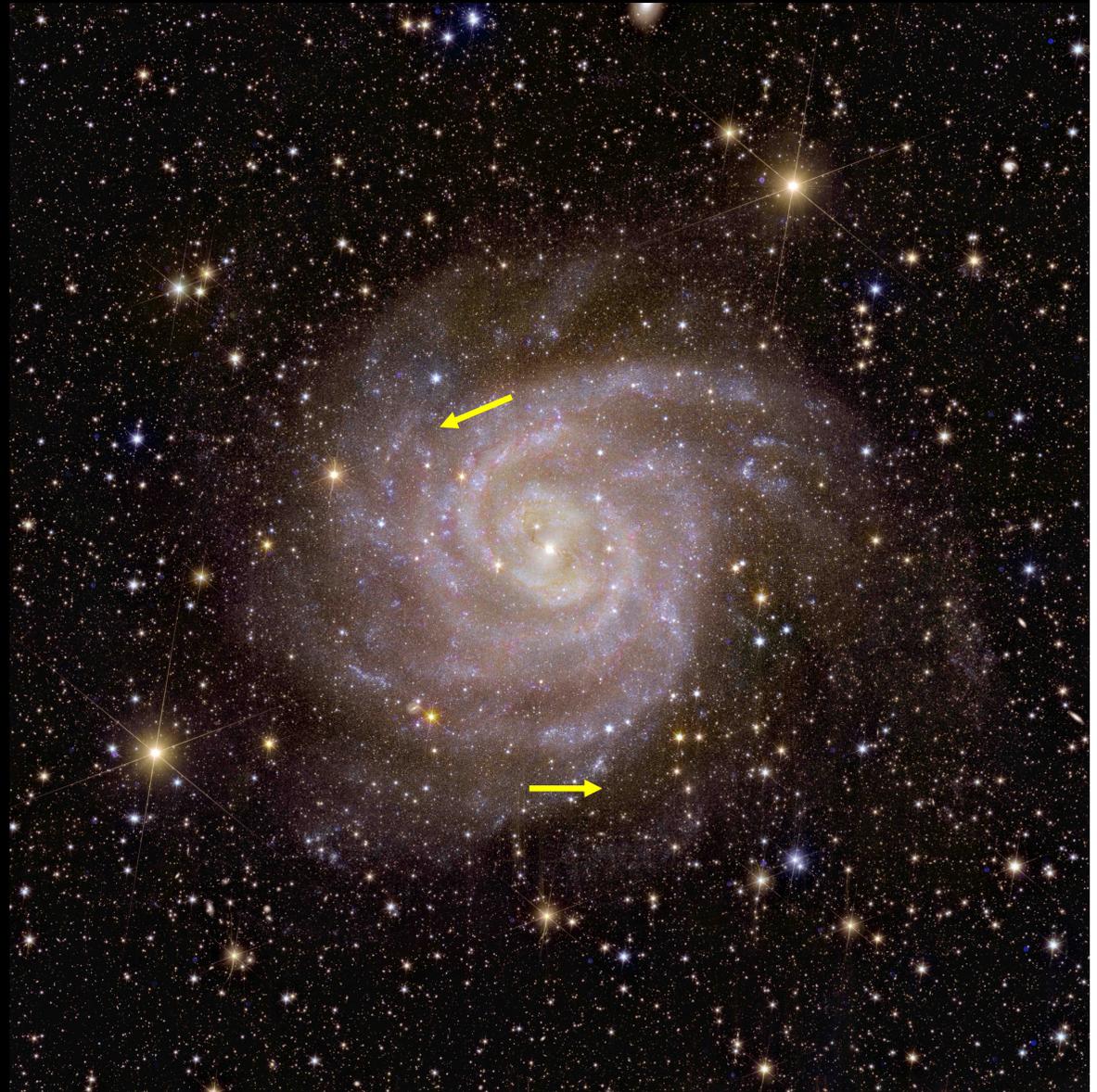
Système solaire

● Atomes



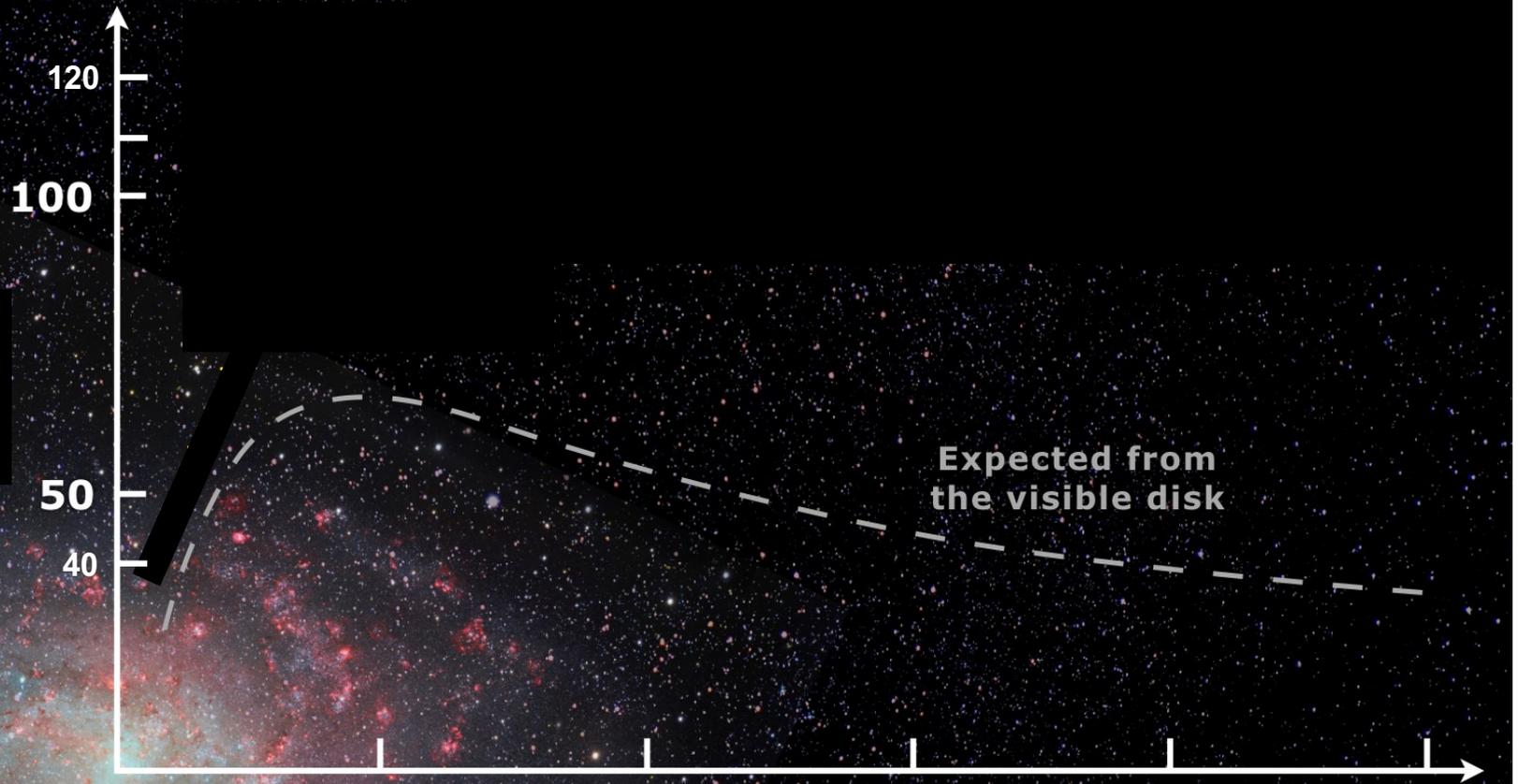
une galaxie spirale ne tourne pas rond ?

Prédiction de la vitesse de rotation des étoiles au bord de la galaxie ?



depuis quasiment 1 siècle

**v = vitesse
de rotation
(km/s)**

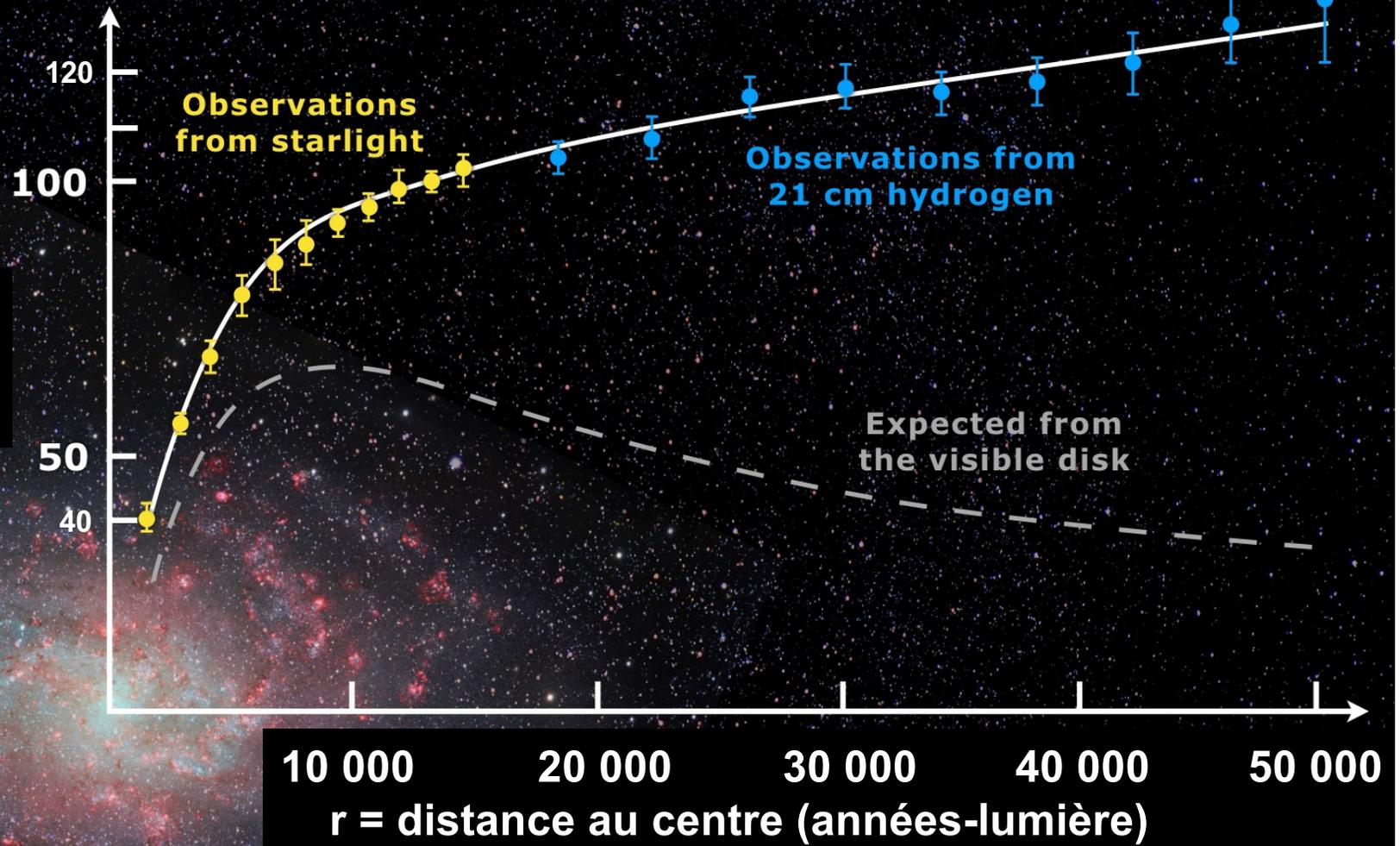


Expected from
the visible disk

10 000 20 000 30 000 40 000 50 000
r = distance au centre (années-lumière)

depuis quasiment 1 siècle

v = vitesse
de rotation
(km/s)



théorie ou observation ?

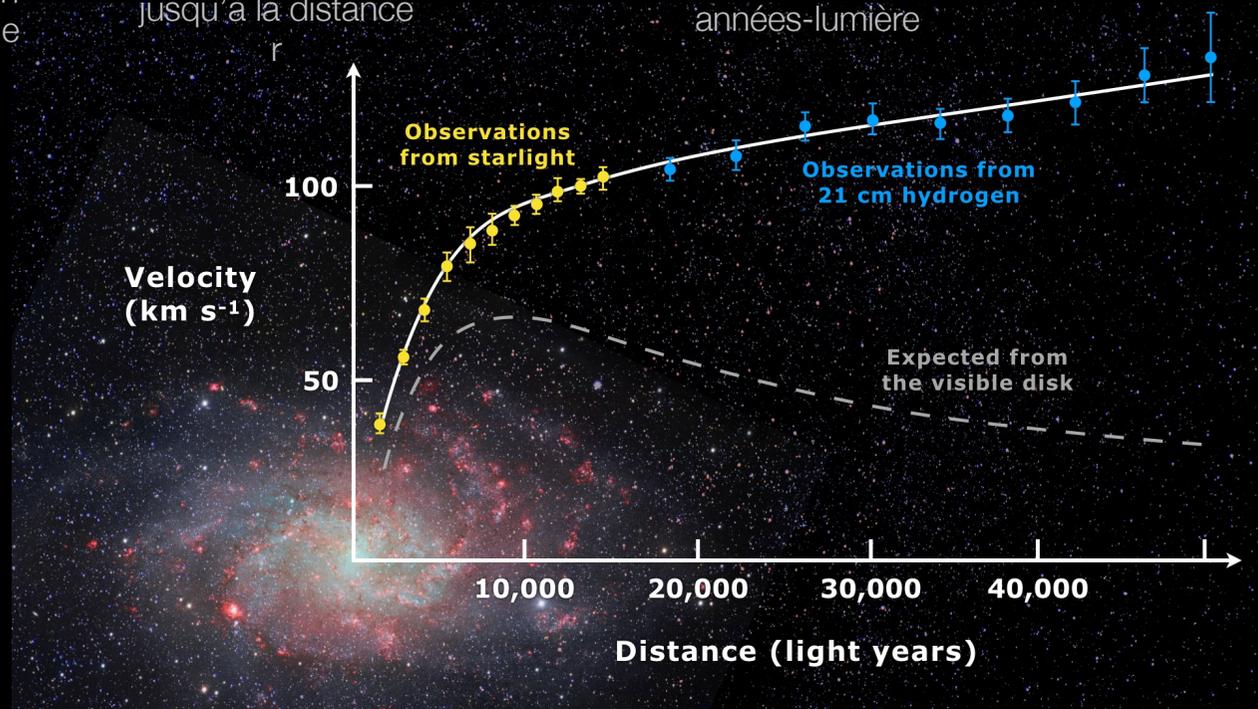
$$v^2 = G M / r$$

Vitesse de rotation
des étoiles dans la
galaxie en km/s

Constante de la
gravitation
universelle

Masse incluse
jusqu'à la distance
 r

Distance de l'étoile au
centre de la galaxie, en
années-lumière



Qu'est ce qui fait augmenter la vitesse de rotation des * ?

$$v^2 = G M / r$$

Vitesse de rotation des étoiles dans la galaxie en km/s

Constante de la gravitation universelle

Masse incluse jusqu'à la distance r

Distance de l'étoile au centre de la galaxie, en années-lumière

La vitesse de rotation des étoiles autour du centre de la galaxie:

- augmente quand la masse M augmente
- diminue quand r augmente, quand on s'éloigne du centre de la galaxie

contenu (densité d'énergie) en fonction de l'échelle spatiale

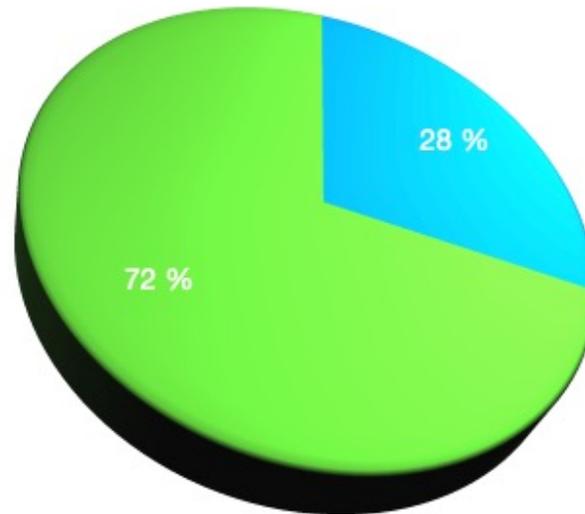
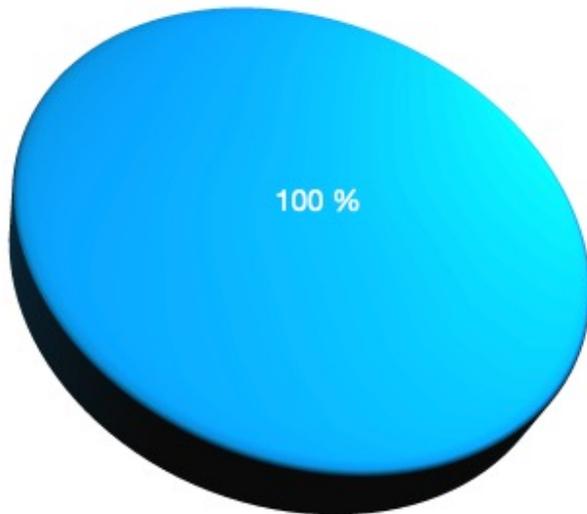


Système solaire



Voie Lactée, $R < 20$ kpc

● Atomes ● Matière noire ● Energie som



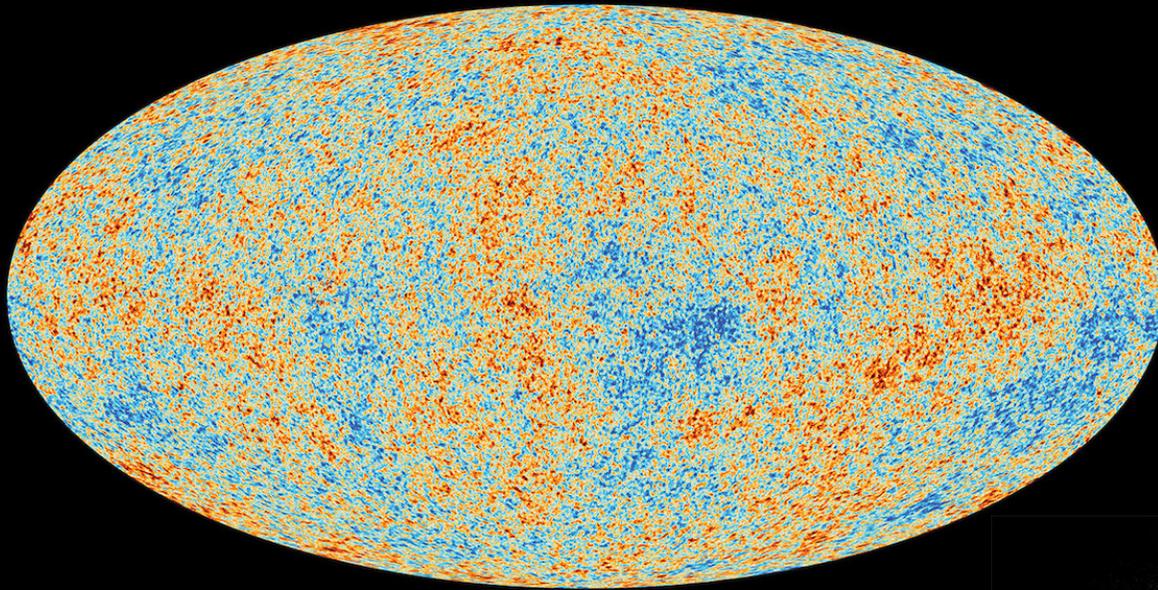
Posti & Helmi, 2019, A&A

Univers à très grande échelle et expansion



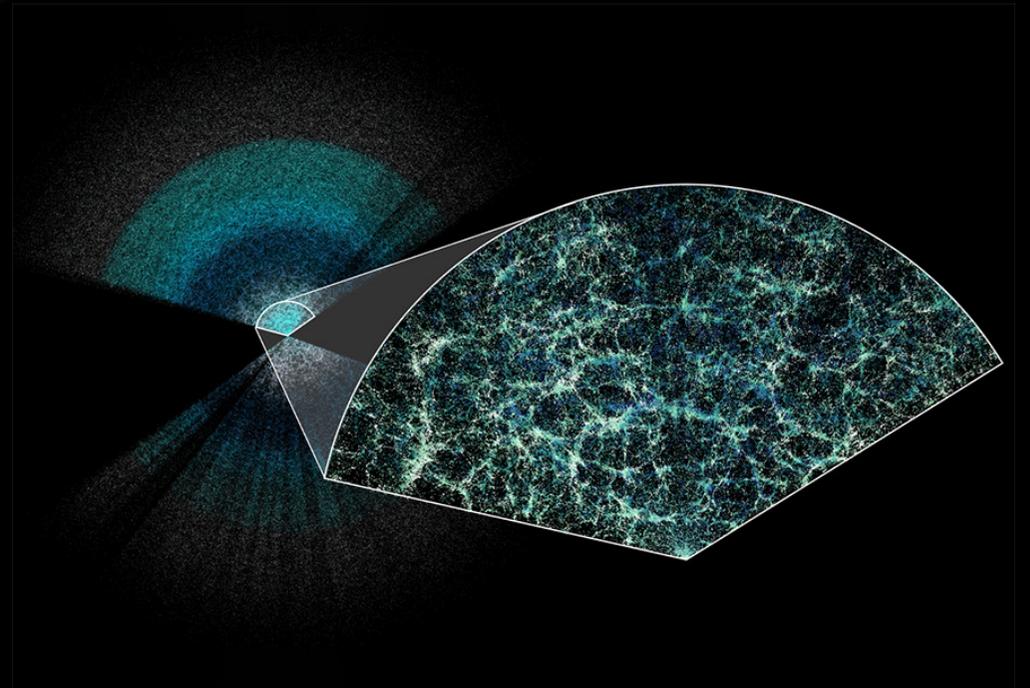
→ THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

Planck Legacy Release 2018



www.esa.int

Credit: ESA/Planck Collaboration



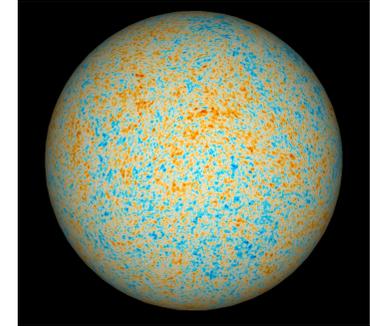
contenu (densité d'énergie) en fonction de l'échelle spatiale



Système solaire

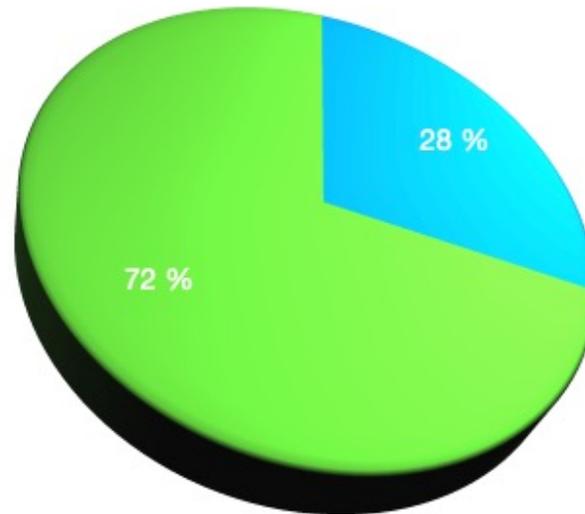
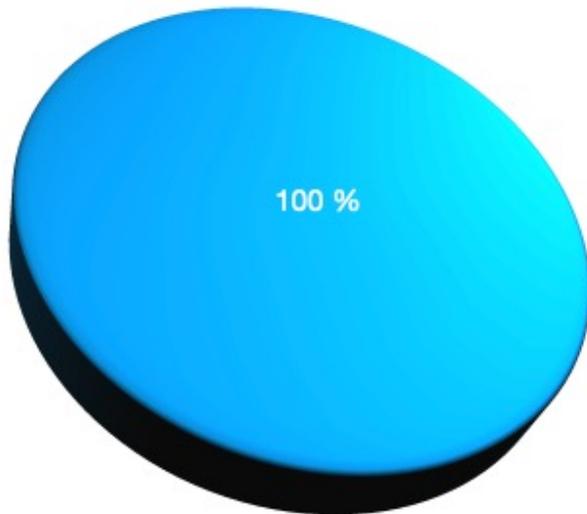


Voie Lactée, $R < 20$ kpc

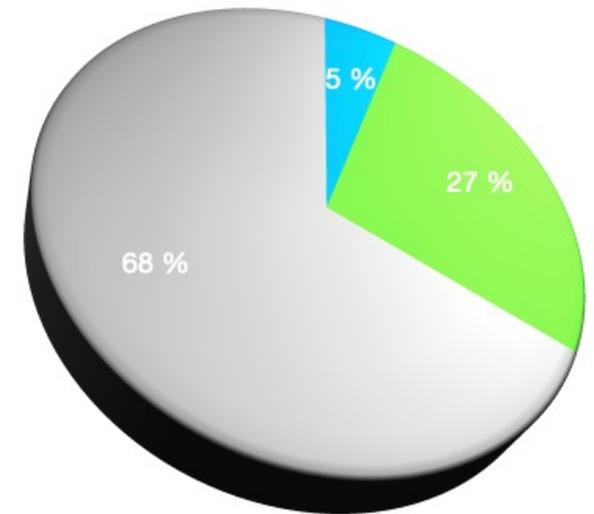


Univers / CMB

● Atomes ● Matière noire ● Energie sarr



Posti & Helmi, 2019, A&A



Planck Collab., I, 2018, A&A

Si l'Univers était une pizza ...

atomes,
baryons

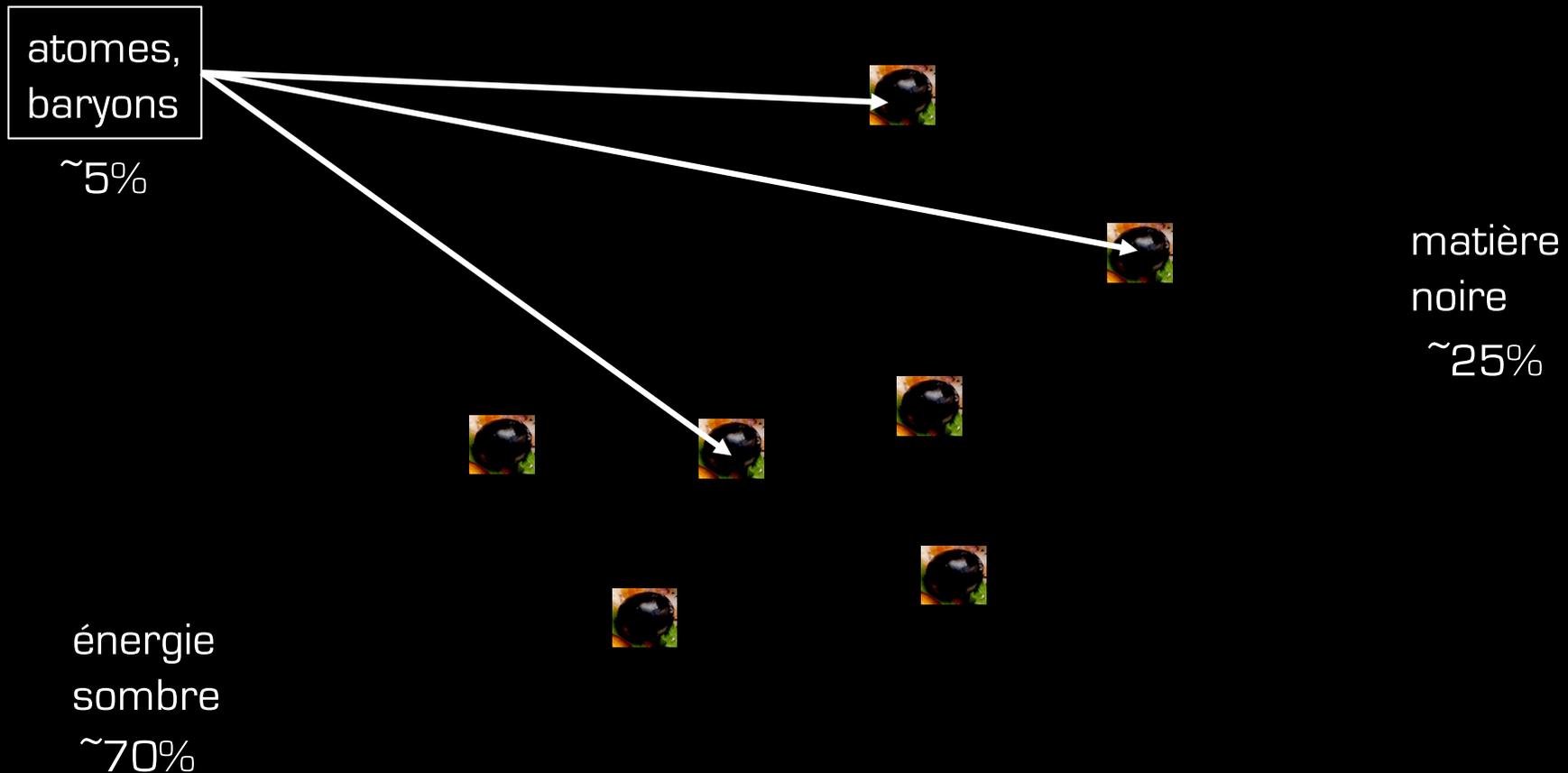


matière
noire

énergie
sombre

If the Universe was a Pizza...

Si l'Univers était une pizza ...



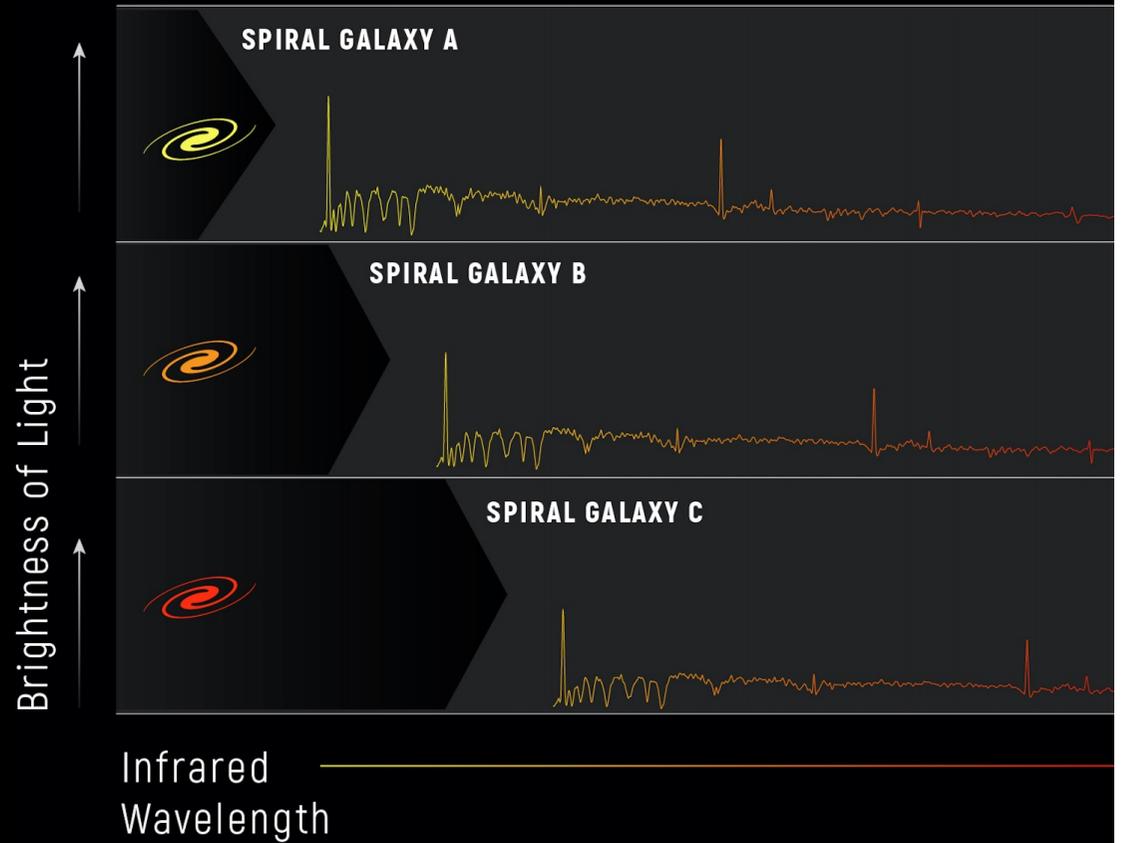
Shutterstock

If the Universe was a Pizza...

COMMENT MESURER LA PRESENCE DE
MATIÈRE NOIRE ET D'ÉNERGIE SOMBRE ?

Masse &

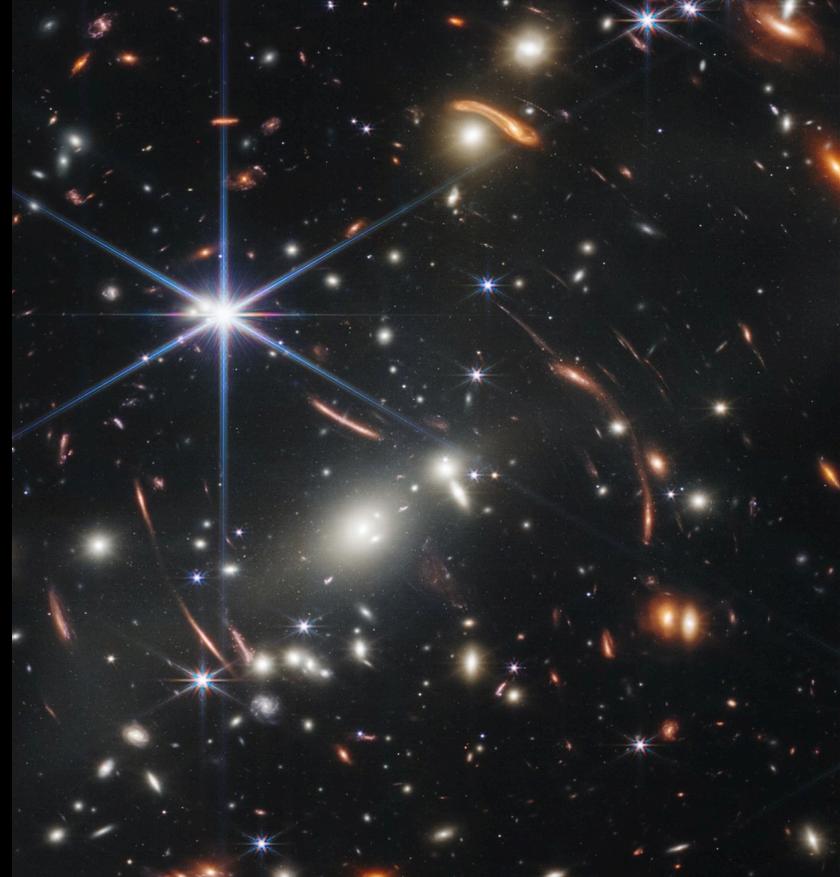
expansion de l'Univers



« Voir » la matière noire



Shutterstock, JWST/NASA/ESA/CSA



« Seeing » Dark Matter



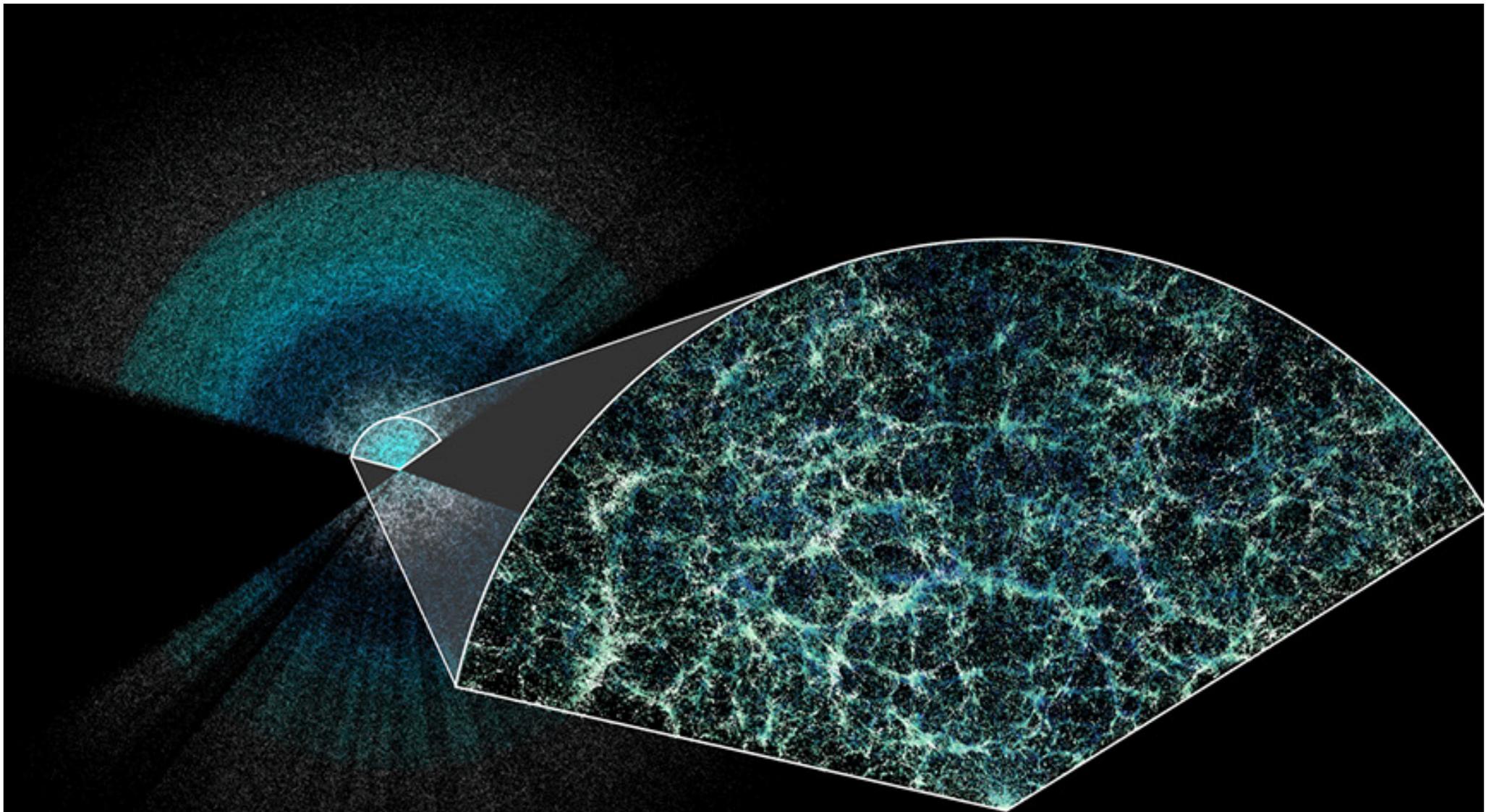
Expansion de l'Univers, pâte à pizza et énergie sombre



Expansion of the Universe, Pizza Dough, Dark Energy

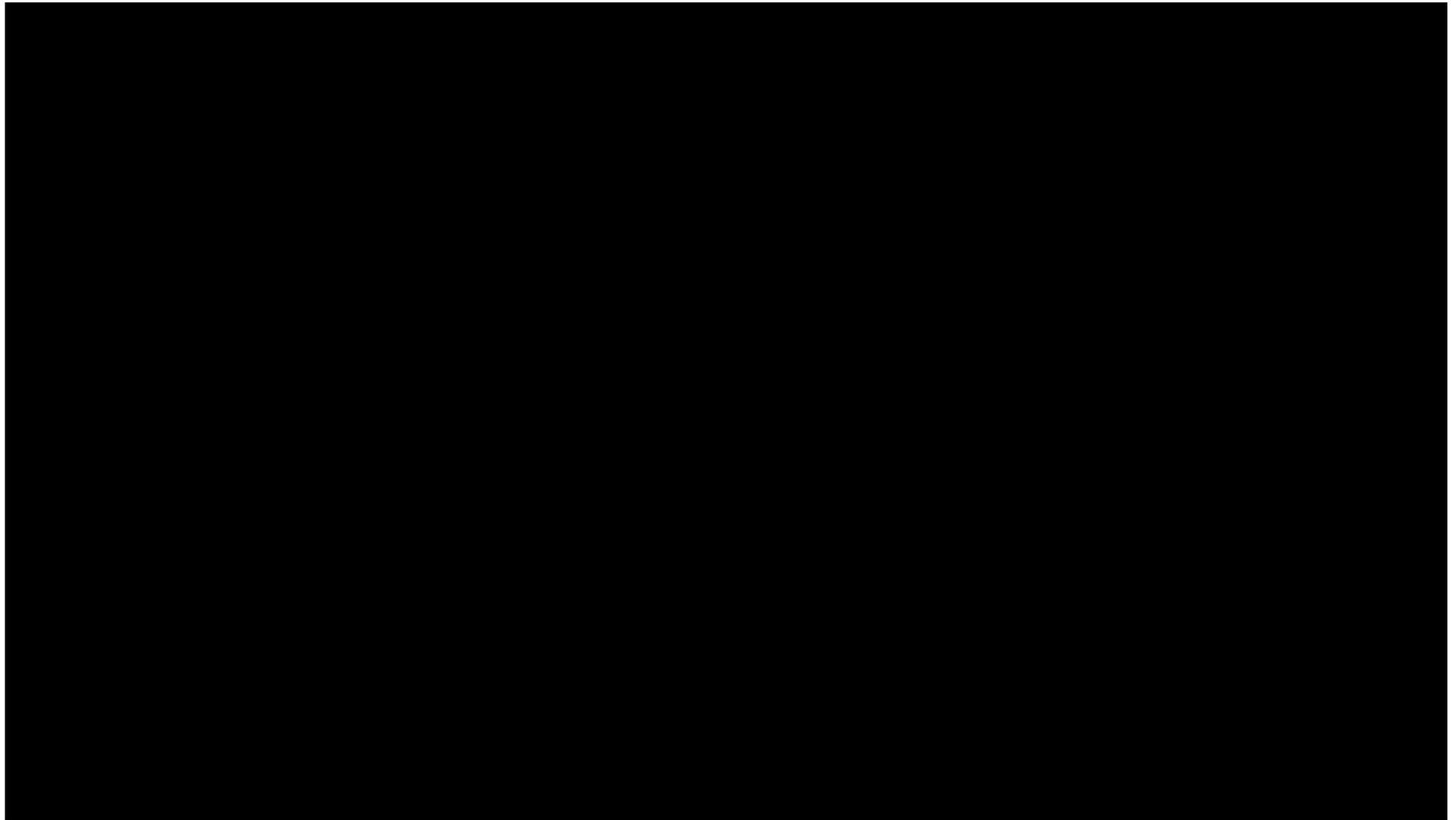
Taille: 100 cMpc
z=4 : âge=1.5 Gans
z=2 : âge=3,5 Gans
z=1 : âge= 6 Gans

Cosmological N-body simulation of the formation and evolution of large scale structures in the Universe. The number of simulated particles is $512^3=134,217,728$. The size of the simulation box is ~ 100 Mpc (about 300 million light years). This simulation was carried on Cray XT4 at Center for Computational Astrophysics, CfCA, of National Astronomical Observatory of Japan. Simulation and Visualization: Tomoaki Ishiyama (University of Tsukuba) - <https://youtu.be/nHvcqV92oqY>



DESI's map of the Universe is the largest to date. The delicate bubble-like structures in the distribution of galaxies—seen in the inset—record vital clues to the expansion history of the universe. Credit: Claire Lamman/DESI collaboration

Univers simulé



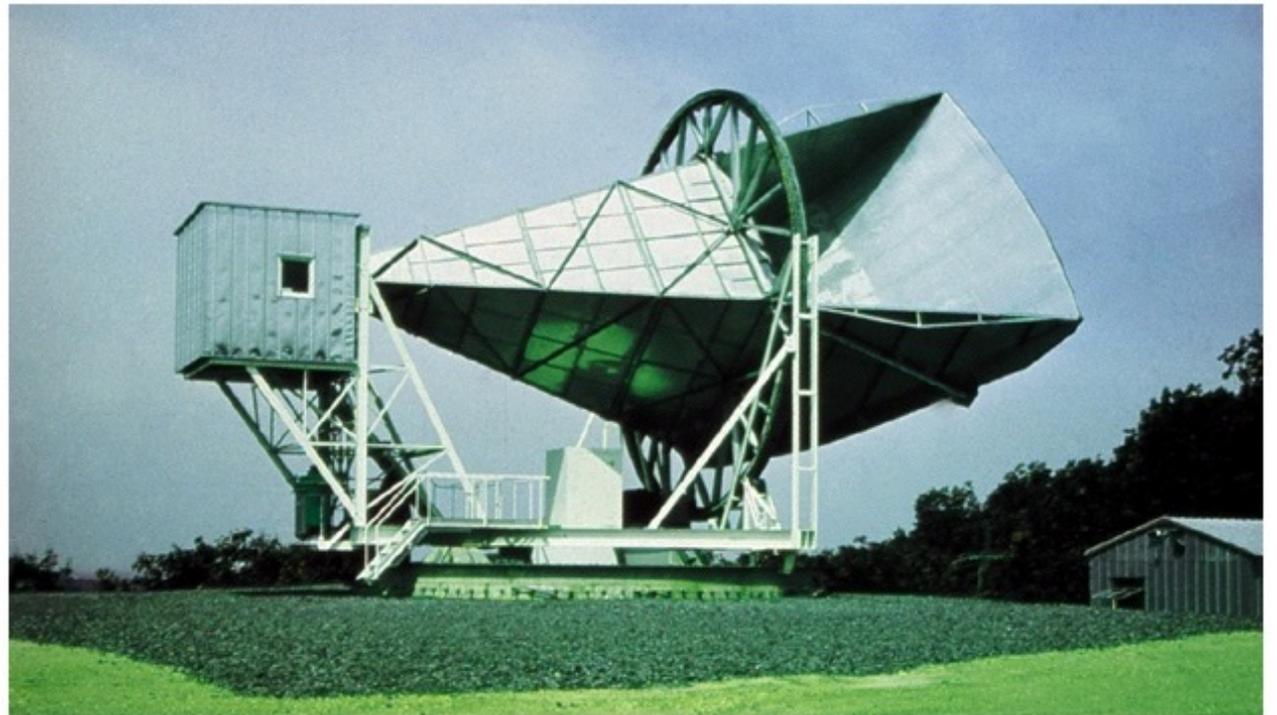
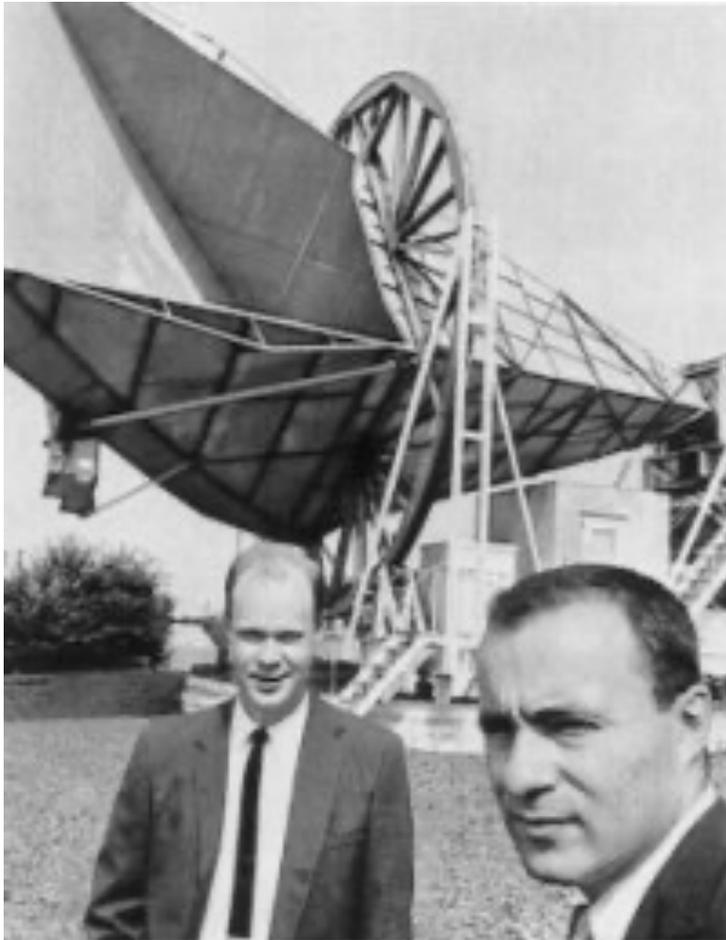
Simulation ILLUSTRIS - <http://www.illustris-project.org/>

8. Fond cosmologique

8. pourquoi la nuit est-elle noire ?



histoire d'une découverte ... 1964



histoire d'une découverte ... 1965

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5°K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

The total antenna temperature measured at the zenith is 6.7°K of which 2.3°K is due to atmospheric absorption. The calculated contribution due to ohmic losses in the antenna and back-lobe response is 0.9°K .

The radiometer used in this investigation has been described elsewhere (Penzias and Wilson 1965). It employs a traveling-wave maser, a low-loss (0.027-dB) comparison switch, and a liquid helium-cooled reference termination (Penzias 1965). Measurements were made by switching manually between the antenna input and the reference termination. The antenna, reference termination, and radiometer were well matched so that a round-trip return loss of more than 55 dB existed throughout the measurement; thus errors in the measurement of the effective temperature due to impedance mismatch can be neglected. The estimated error in the measured value of the total antenna temperature is 0.3°K and comes largely from uncertainty in the absolute calibration of the reference termination.

The contribution to the antenna temperature due to atmospheric absorption was obtained by recording the variation in antenna temperature with elevation angle and employing the secant law. The result, $2.3^\circ \pm 0.3^\circ\text{K}$, is in good agreement with published values (Hogg 1959; DeGrasse, Hogg, Ohm, and Scovil 1959; Ohm 1961).

The contribution to the antenna temperature from ohmic losses is computed to be

We are grateful to R. H. Dicke and his associates for fruitful discussions of their results prior to publication. We also wish to acknowledge with thanks the useful comments and advice of A. B. Crawford, D. C. Hogg, and E. A. Ohm in connection with the problems associated with this measurement.

No. 1, 1965

LETTERS TO THE EDITOR

421

Note added in proof.—The highest frequency at which the background temperature of the sky had been measured previously was 404 Mc/s (Pauliny-Toth and Shakeshaft 1962), where a minimum temperature of 16°K was observed. Combining this value with our result, we find that the average spectrum of the background radiation over this frequency range can be no steeper than $\lambda^0.7$. This clearly eliminates the possibility that the radiation we observe is due to radio sources of types known to exist, since in this event, the spectrum would have to be very much steeper.

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

REFERENCES

- Crawford, A. B., Hogg, D. C., and Hunt, L. E. 1961, *Bell System Tech. J.*, **40**, 1095.
DeGrasse, R. W., Hogg, D. C., Ohm, E. A., and Scovil, H. E. D. 1959, "Ultra-low Noise Receiving System for Satellite or Space Communication," *Proceedings of the National Electronics Conference*, **15**, 370.
Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., and Wilkinson, D. T. 1965, *Ap J.*, **142**, 414.
Hogg, D. C. 1959, *J. Appl. Phys.*, **30**, 1417.
Ohm, E. A. 1961, *Bell System Tech. J.*, **40**, 1065.
Pauliny-Toth, I. I. K., and Shakeshaft, J. R. 1962, *M.N.*, **124**, 61.
Penzias, A. A. 1965, *Rev. Sci. Instr.*, **36**, 68.

COSMIC BLACK-BODY RADIATION*

One of the basic problems of cosmology is the singularity characteristic of the familiar cosmological solutions of Einstein's field equations. Also puzzling is the presence of matter in excess over antimatter in the universe, for baryons and leptons are thought to be conserved. Thus, in the framework of conventional theory we cannot understand the origin of matter or of the universe. We can distinguish three main attempts to deal with these problems.

1. The assumption of continuous creation (Bondi and Gold 1948; Hoyle 1948), which avoids the singularity by postulating a universe expanding for all time and a continuous but slow creation of new matter in the universe.
2. The assumption (Wheeler 1964) that the creation of new matter is intimately related to the existence of the singularity, and that the resolution of both paradoxes may be found in a proper quantum mechanical treatment of Einstein's field equations.
3. The assumption that the singularity results from a mathematical over-idealization,

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 gravi-

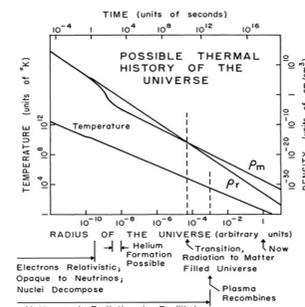


FIG. 1—Possible thermal history of the Universe. The figure shows the previous thermal history of

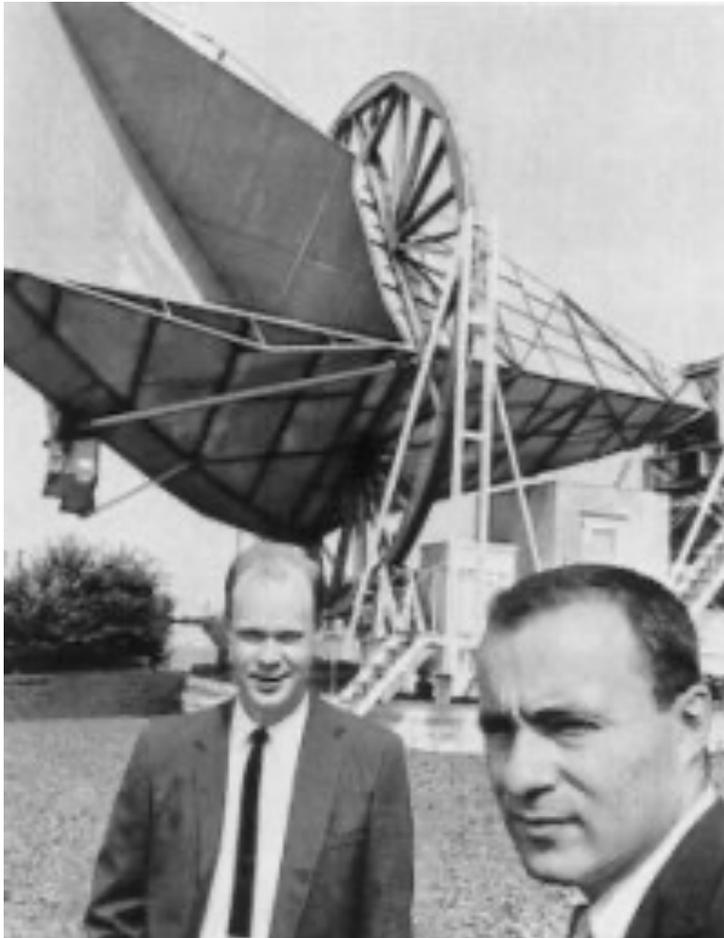
We deeply appreciate the helpfulness of Drs. Penzias and Wilson of the Bell Telephone Laboratories, Crawford Hill, Holmdel, New Jersey, in discussing with us the result of their measurements and in showing us their receiving system. We are also grateful for several helpful suggestions of Professor J. A. Wheeler.

R. H. DICKE
P. J. E. PEEBLES
P. G. ROLL
D. T. WILKINSON

May 7, 1965
PALMER PHYSICAL LABORATORY
PRINCETON, NEW JERSEY



histoire d'une découverte ... 1978



The Nobel Prize in Physics 1978

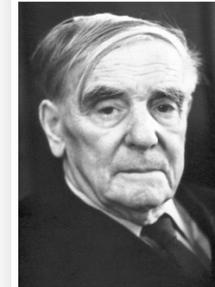


Photo from the Nobel Foundation archive.
Pyotr Leonidovich Kapitsa
Prize share: 1/2

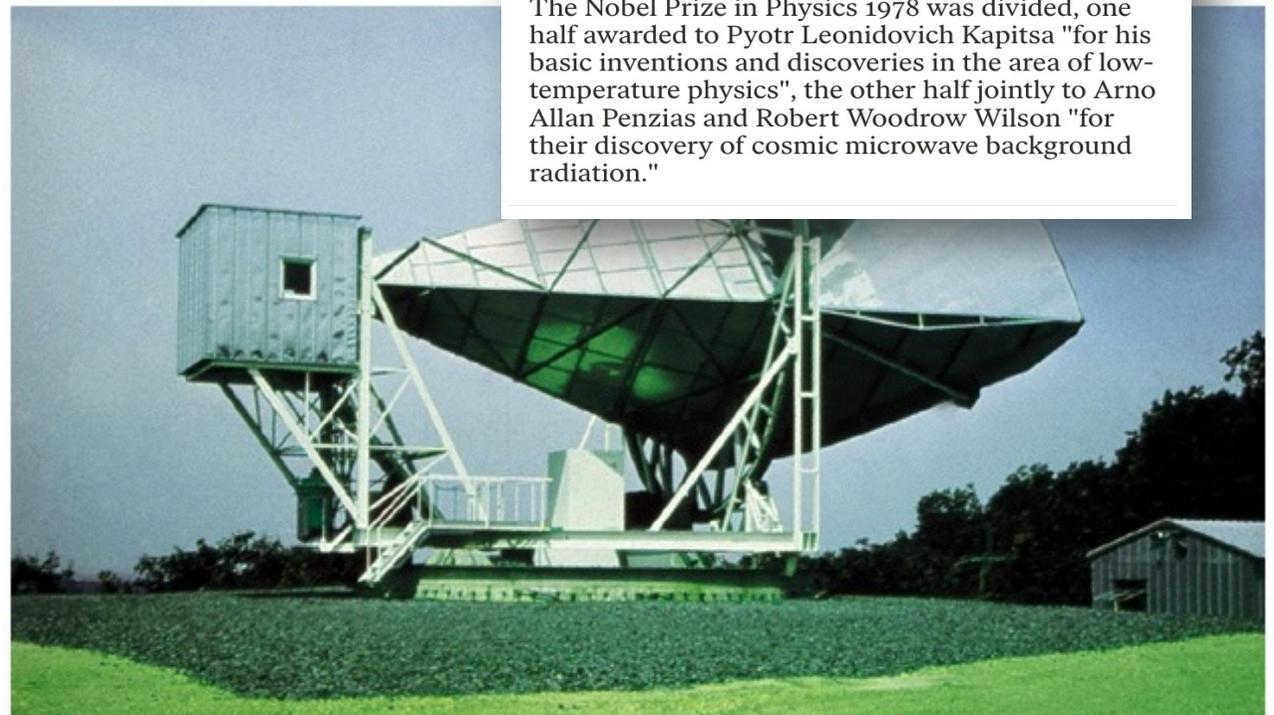


Photo from the Nobel Foundation archive.
Arno Allan Penzias
Prize share: 1/4



Photo from the Nobel Foundation archive.
Robert Woodrow Wilson
Prize share: 1/4

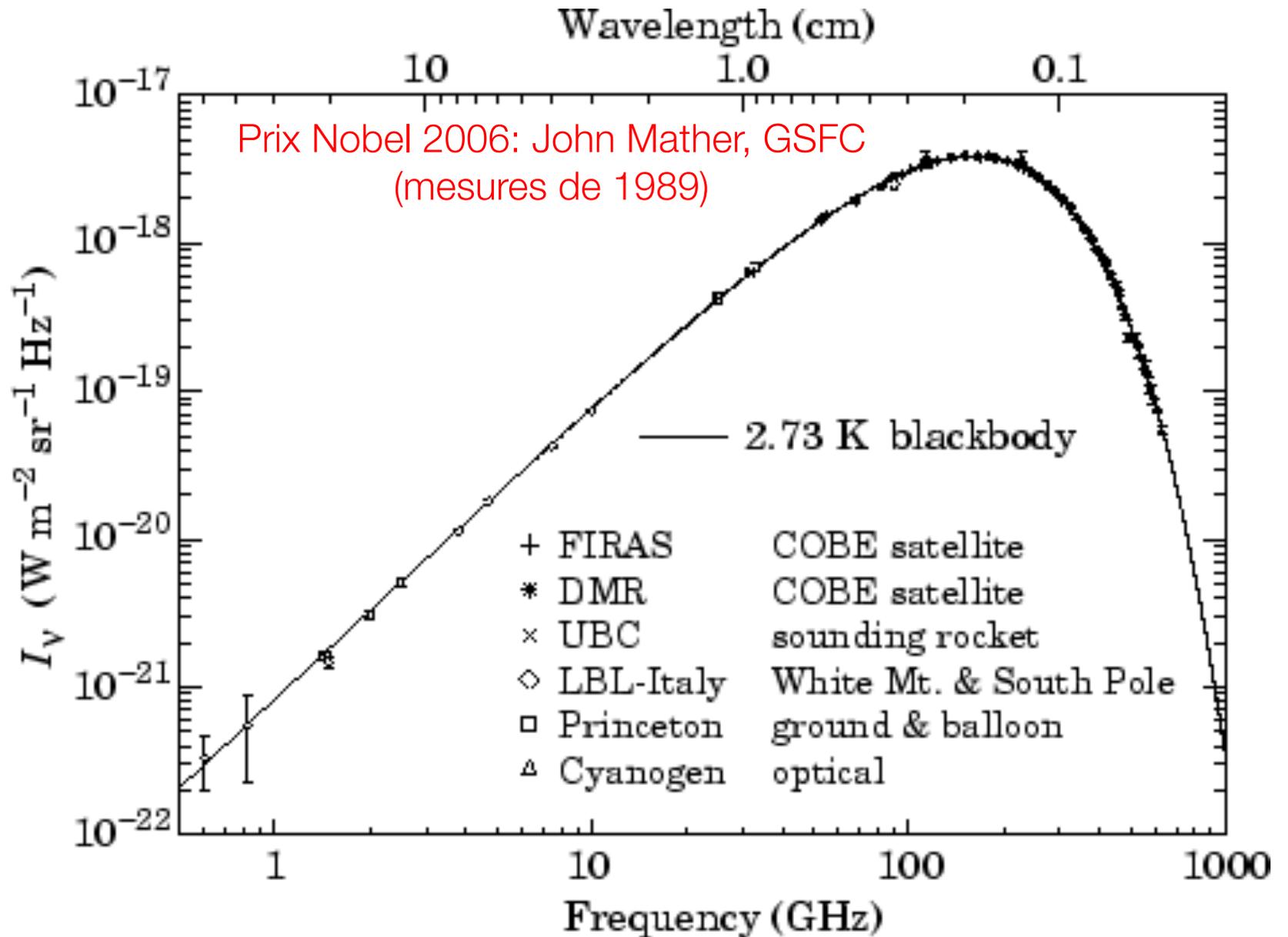
The Nobel Prize in Physics 1978 was divided, one half awarded to Pyotr Leonidovich Kapitsa "for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics", the other half jointly to Arno Allan Penzias and Robert Woodrow Wilson "for their discovery of cosmic microwave background radiation."



propriétés du fond diffus cosmologique

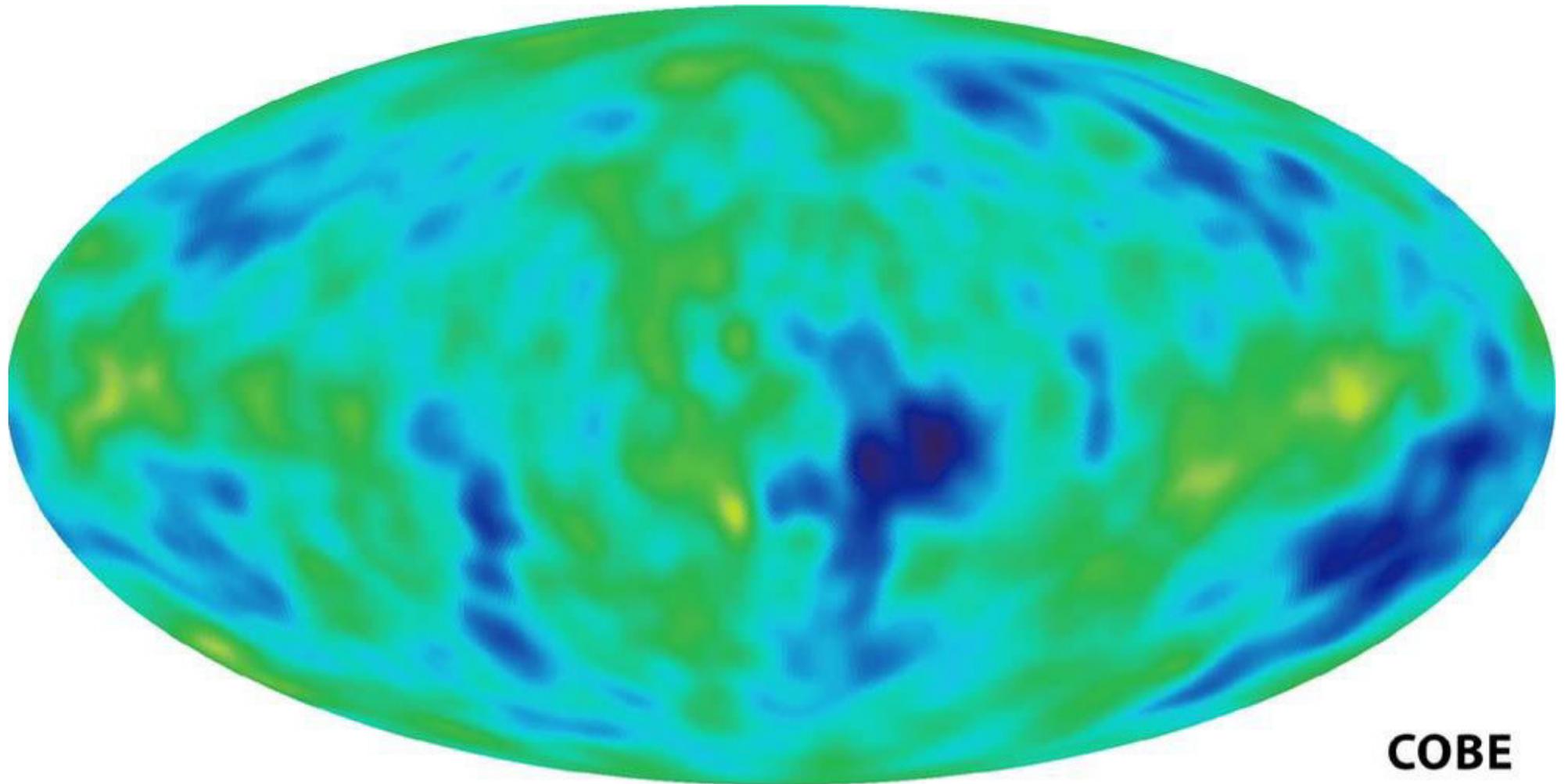
rayonnement
de corps noir
 $T=2.725\text{ K}$

L'Univers est
rempli de
rayonnement:
**la nuit n'est
pas noire,**
mais brillante
en radio.



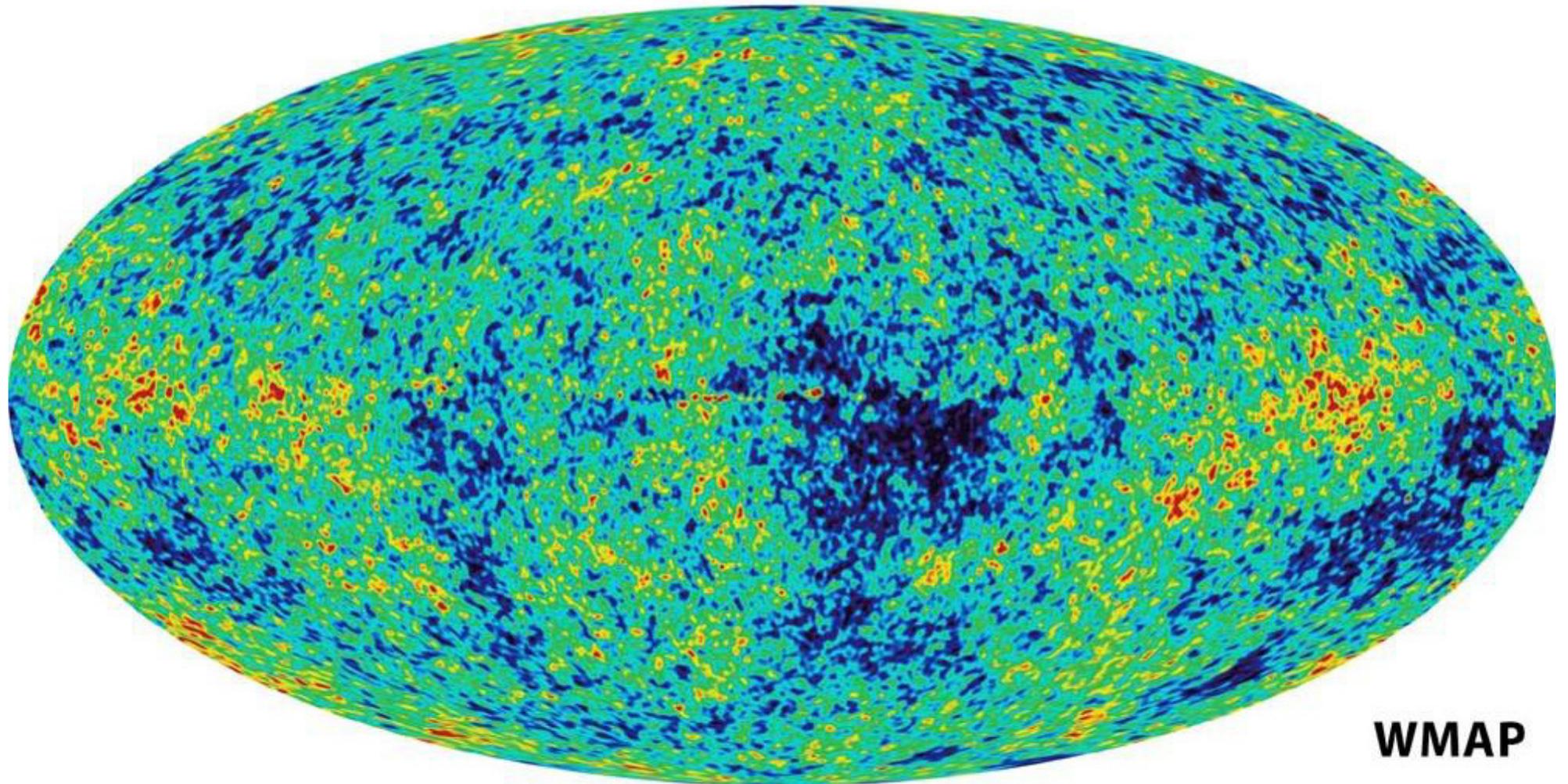
fluctuations de température

l'amplitude des fluctuations est de l'ordre de la dizaine de microKelvin !

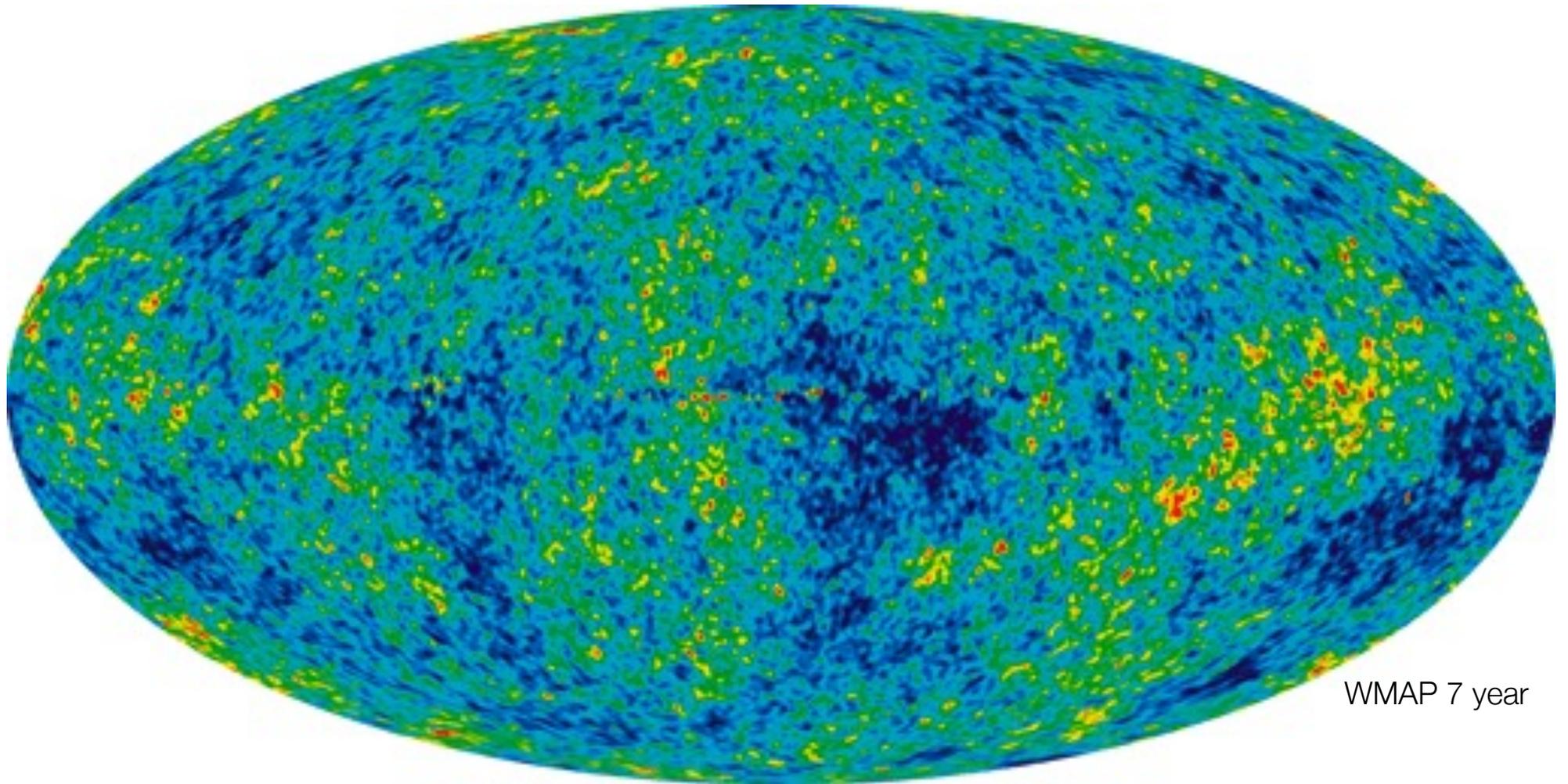


Prix Nobel 2006: George Smoot, Berkeley
(mesures de 1992)

fluctuations de température



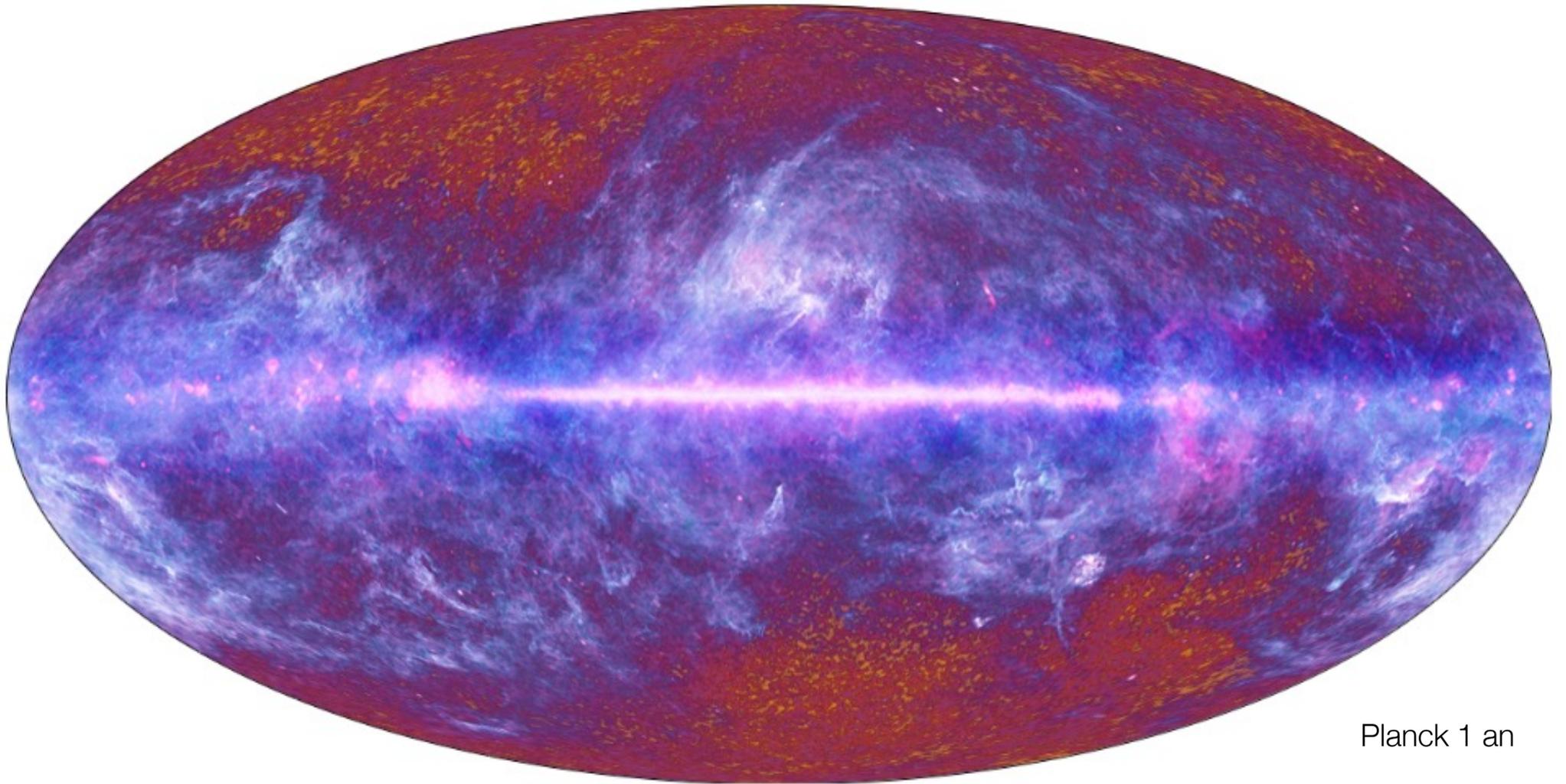
fluctuations de température



WMAP 7 year

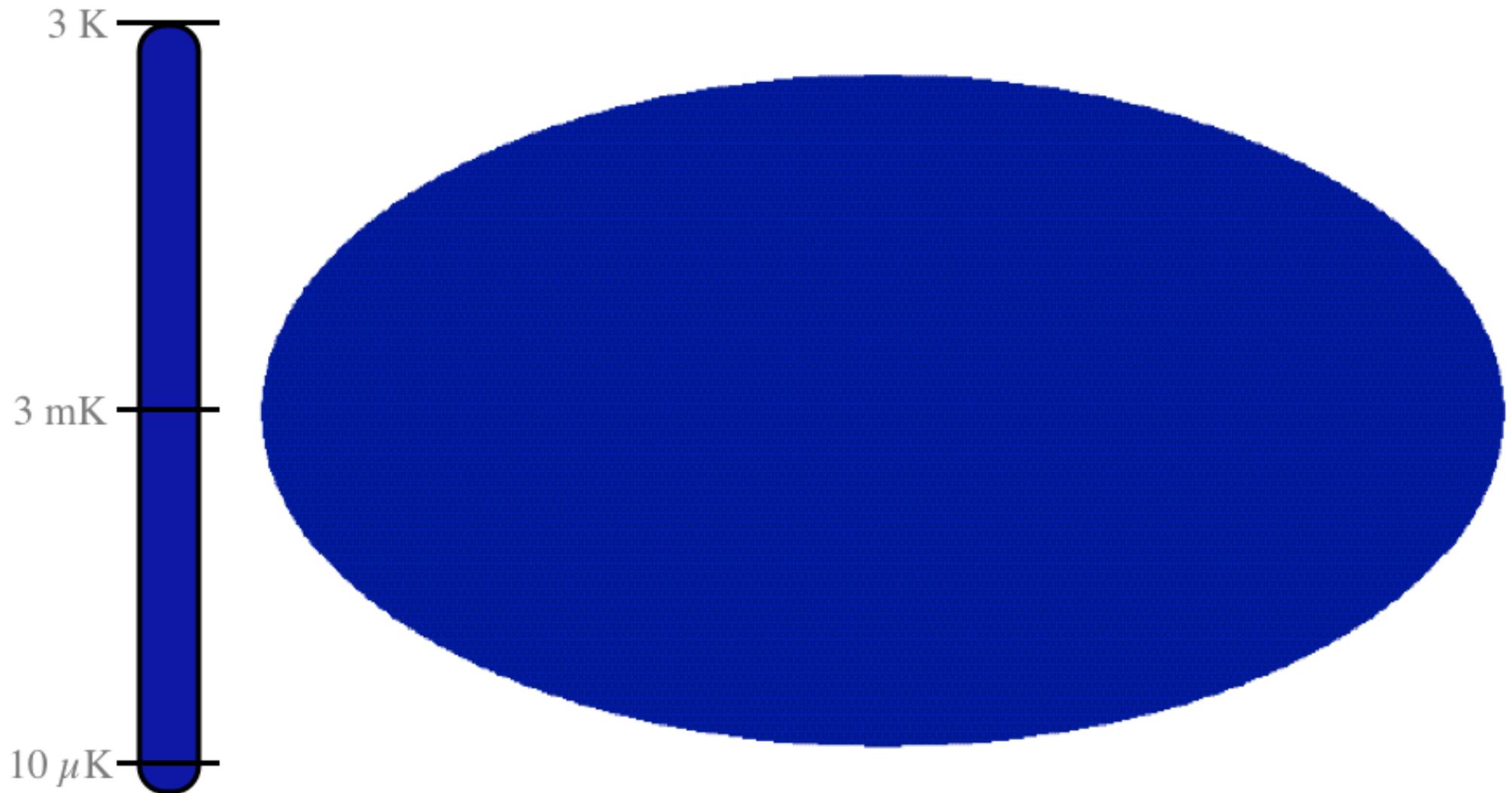
fluctuations de température

+ Galaxie et galaxies, amas etc.

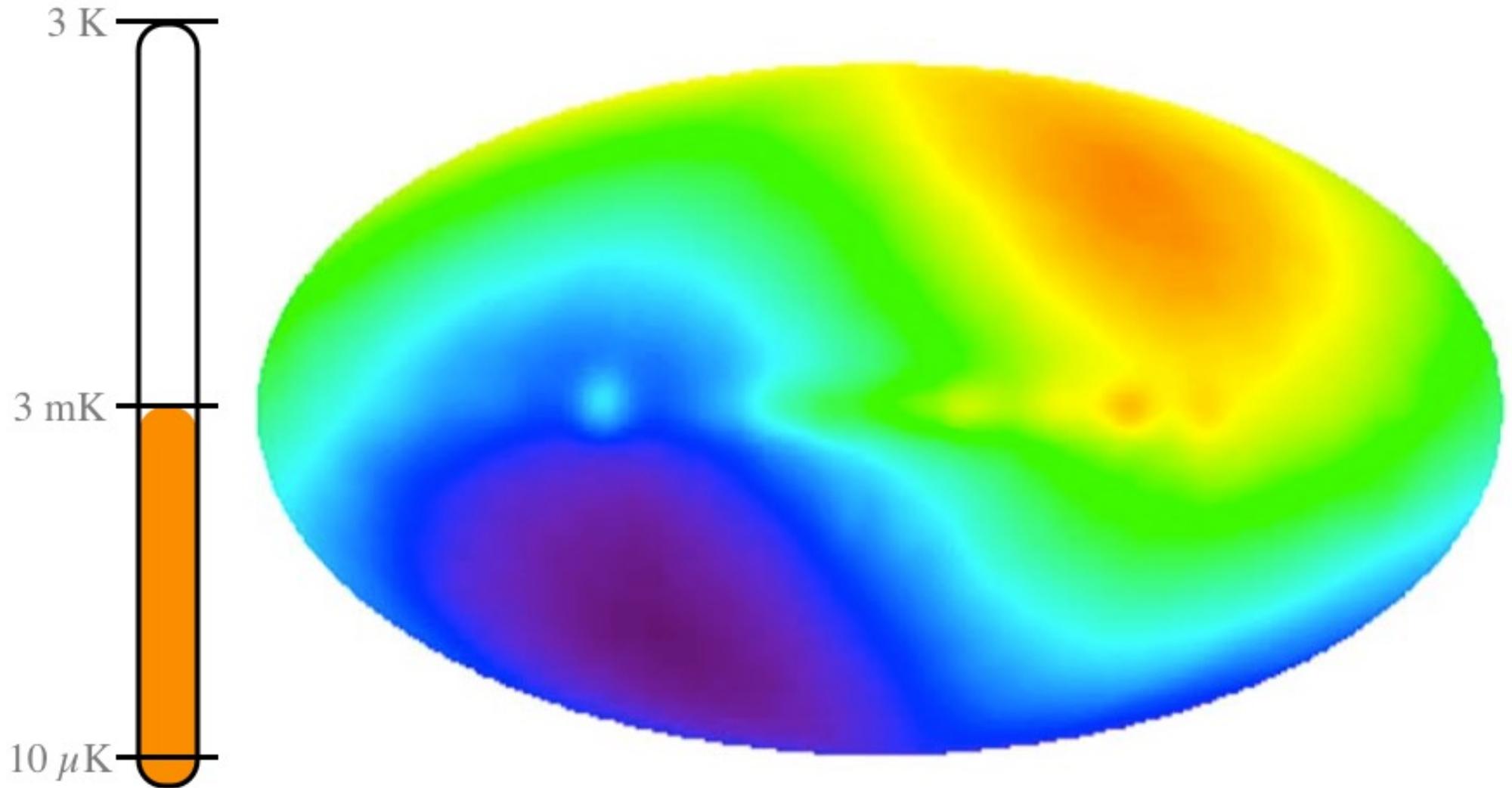


Planck 1 an

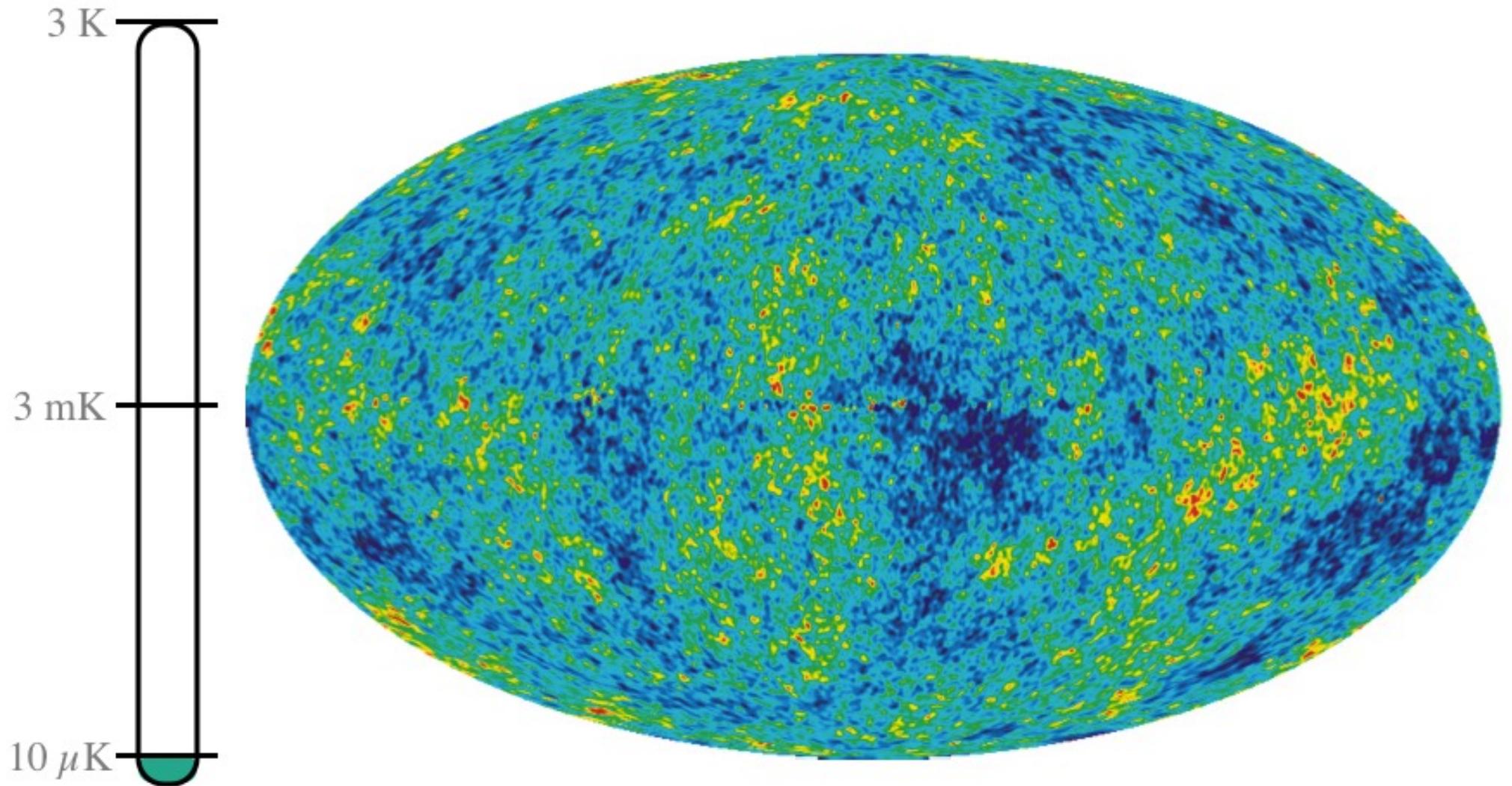
fond cosmologique CMB



fond cosmologique CMB

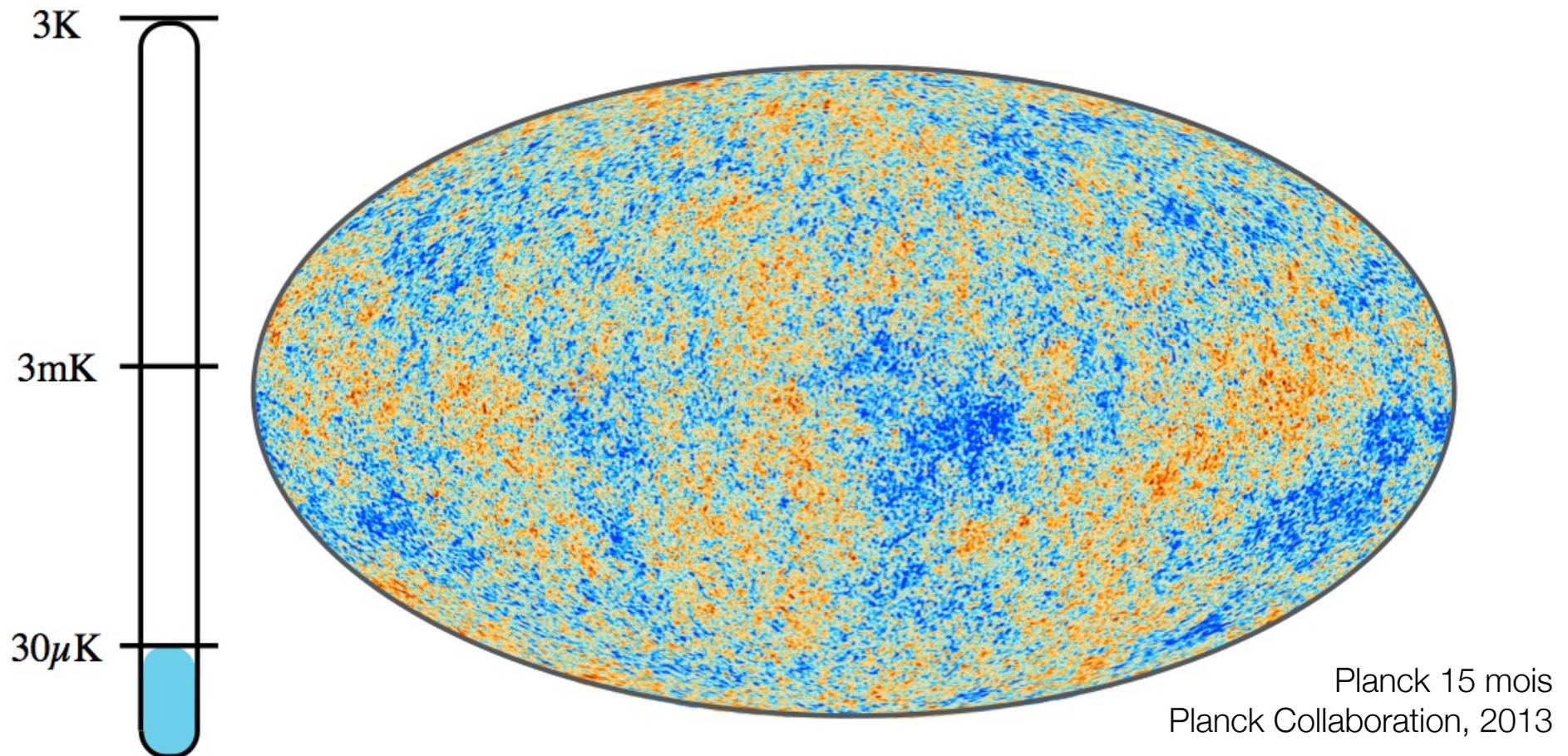


fond cosmologique CMB

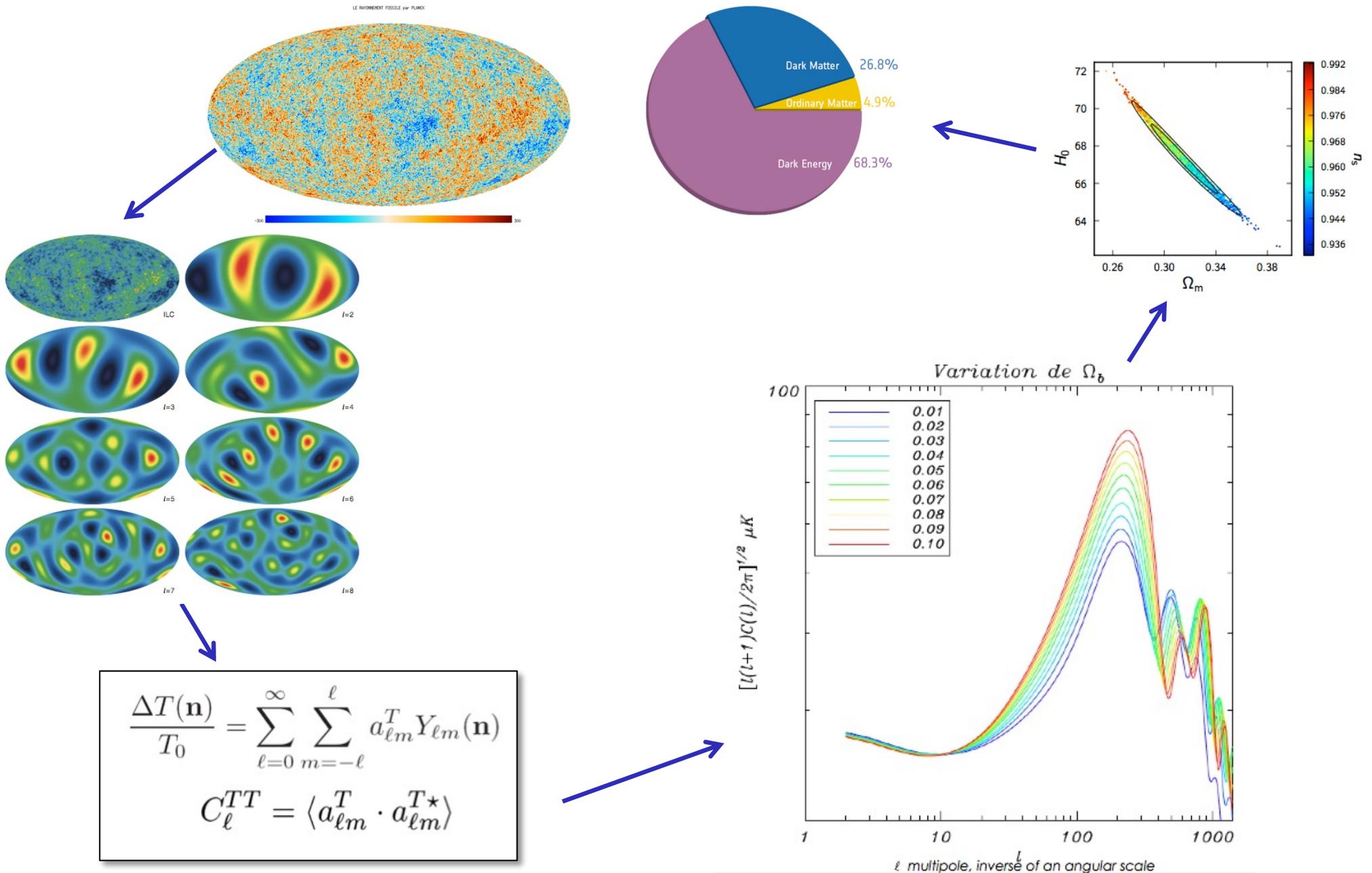


Le Fond Diffus Cosmologique (CMB)

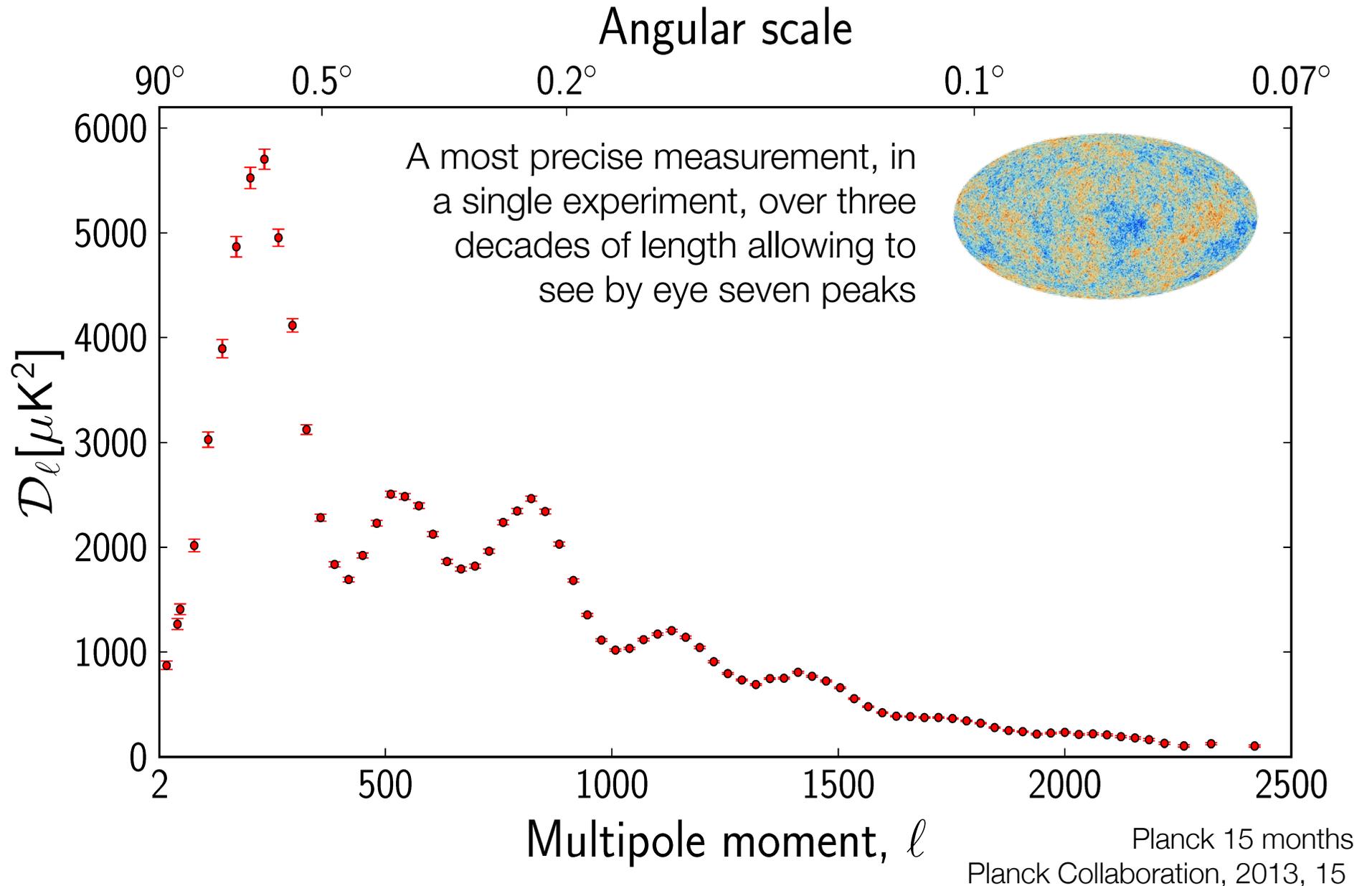
- ★ Rayonnement découvert par [Penzias et Wilson 1965]
- ★ En première approximation homogène et isotrope, $T = 2.725 \pm 0.001$ K
- ★ ... mais il existe des **anisotropies** qui sont les empreintes des **fluctuations de densité primordiales**



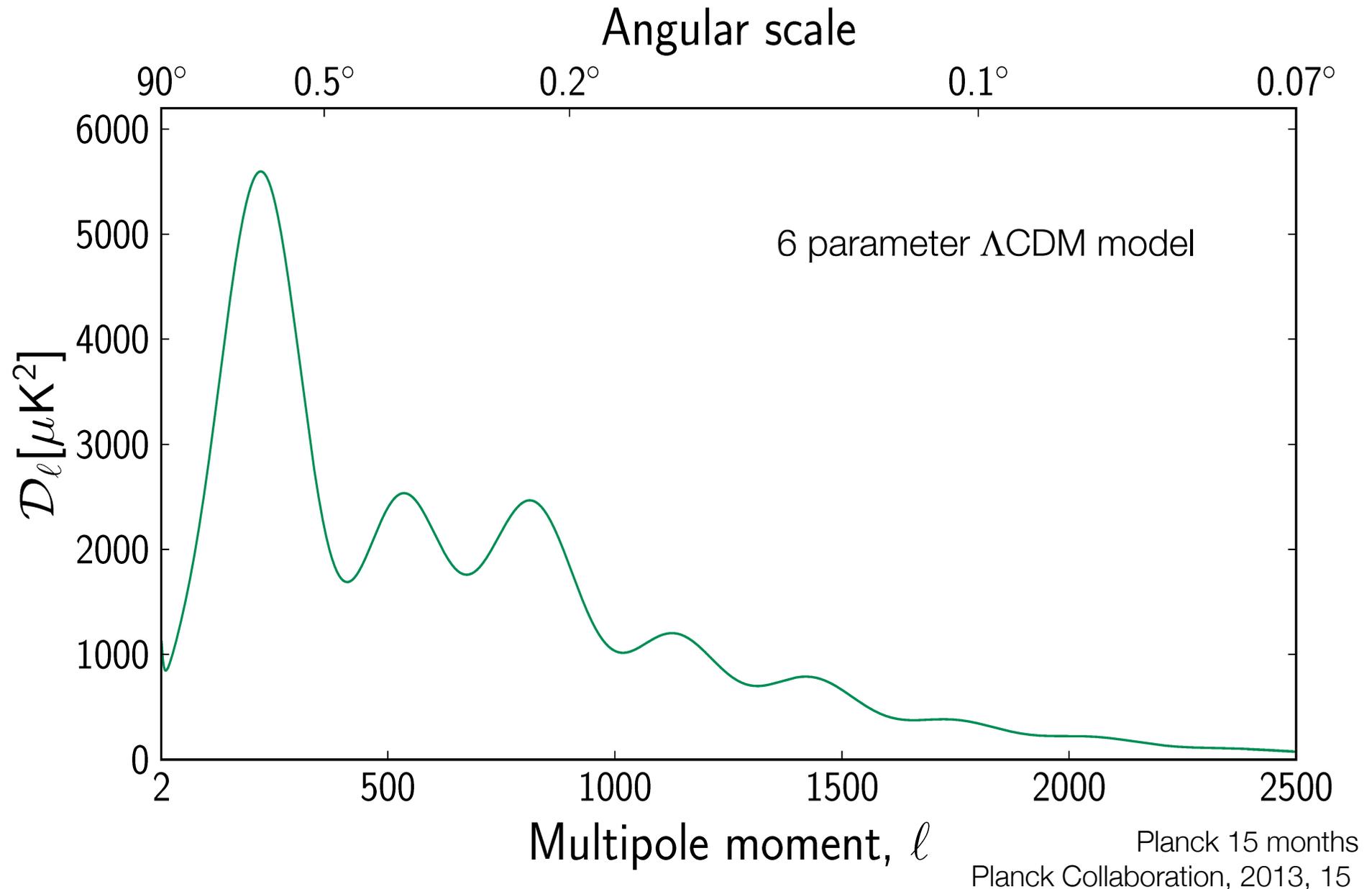
from maps to 6 cosmological parameters



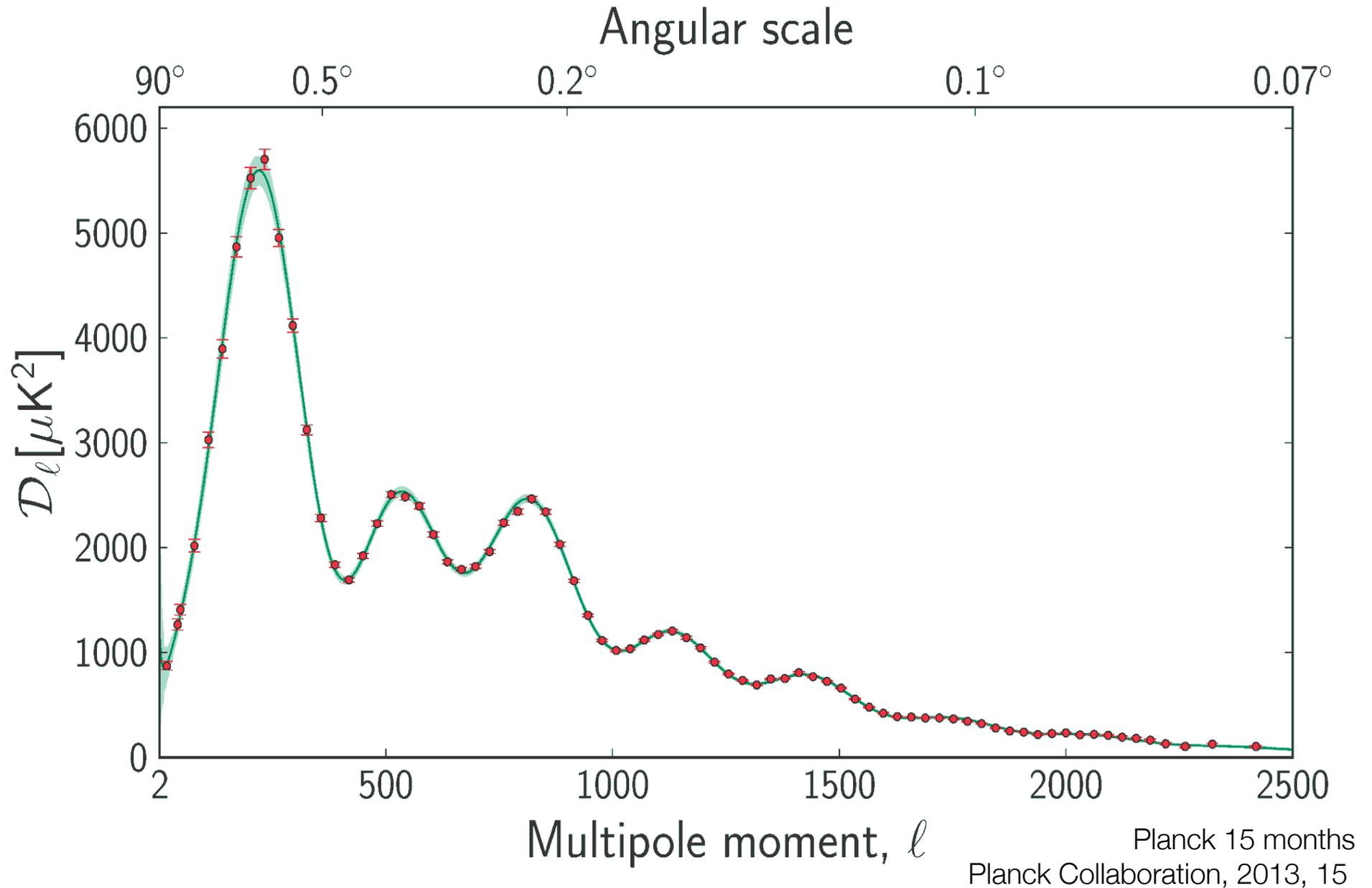
the Planck spectrum of temperature anisotropies



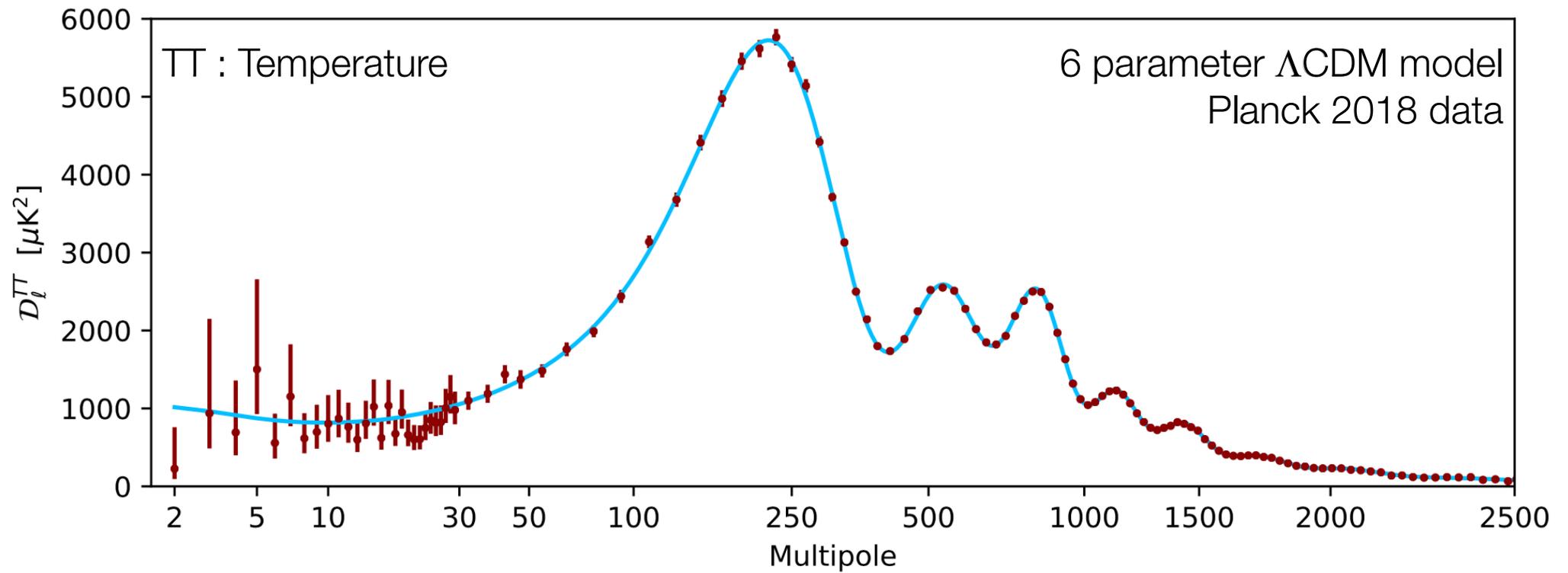
Planck best fitting theoretical model



theory confronts data

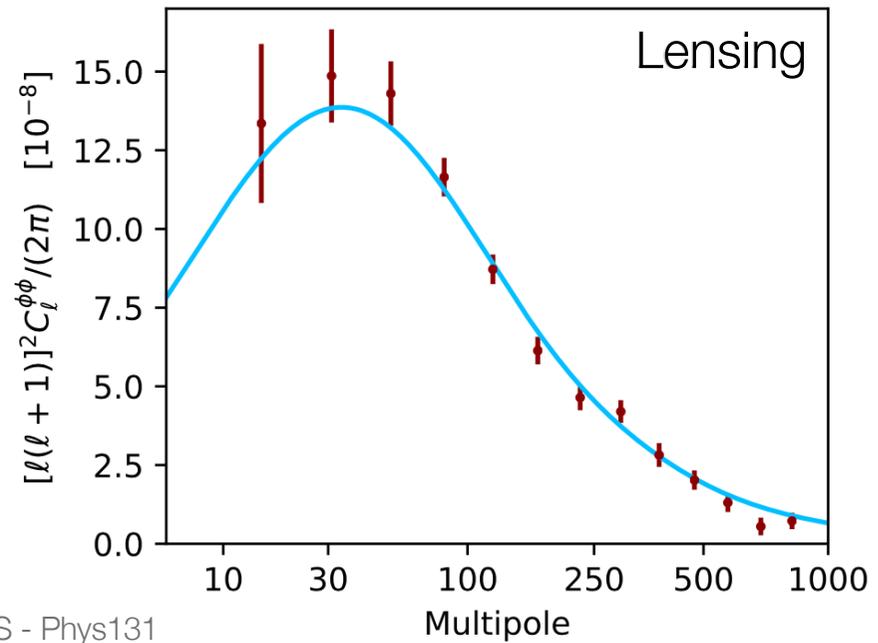
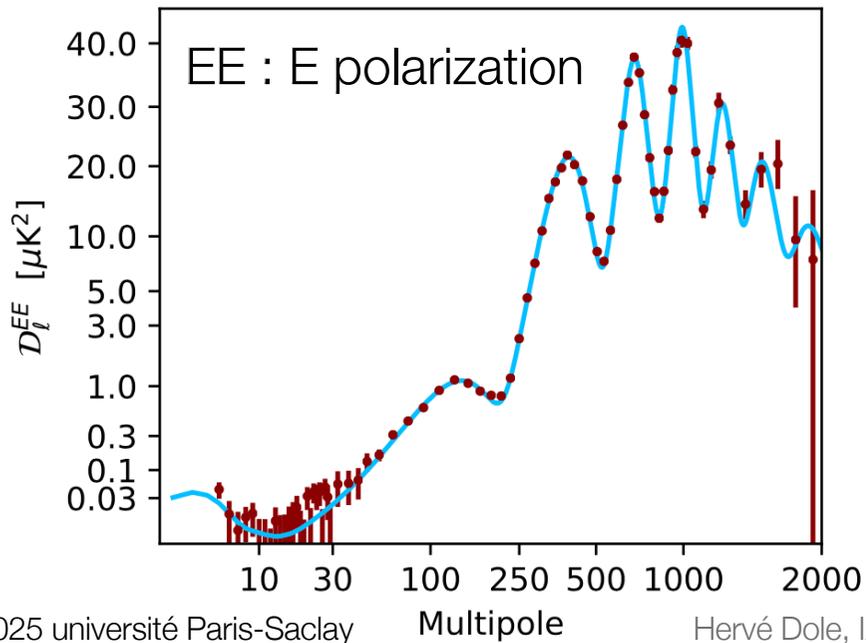
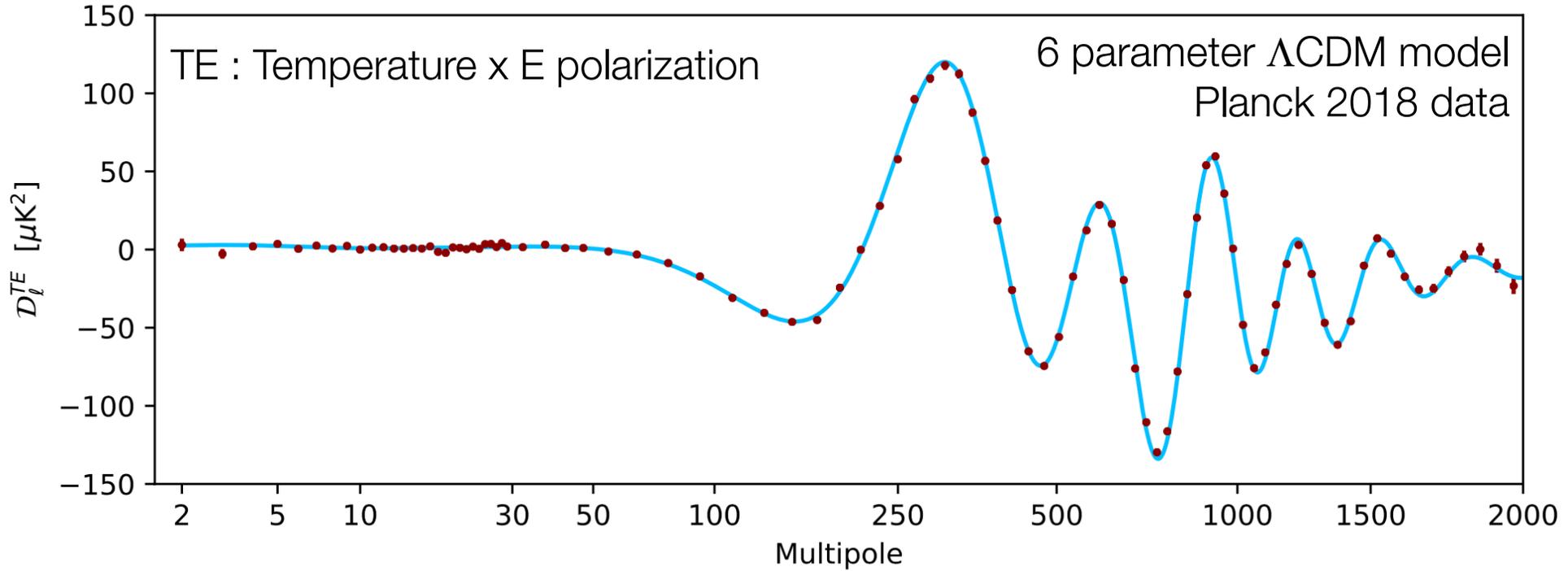


theory confronts data 2018



Planck Collaboration, 2018, 1

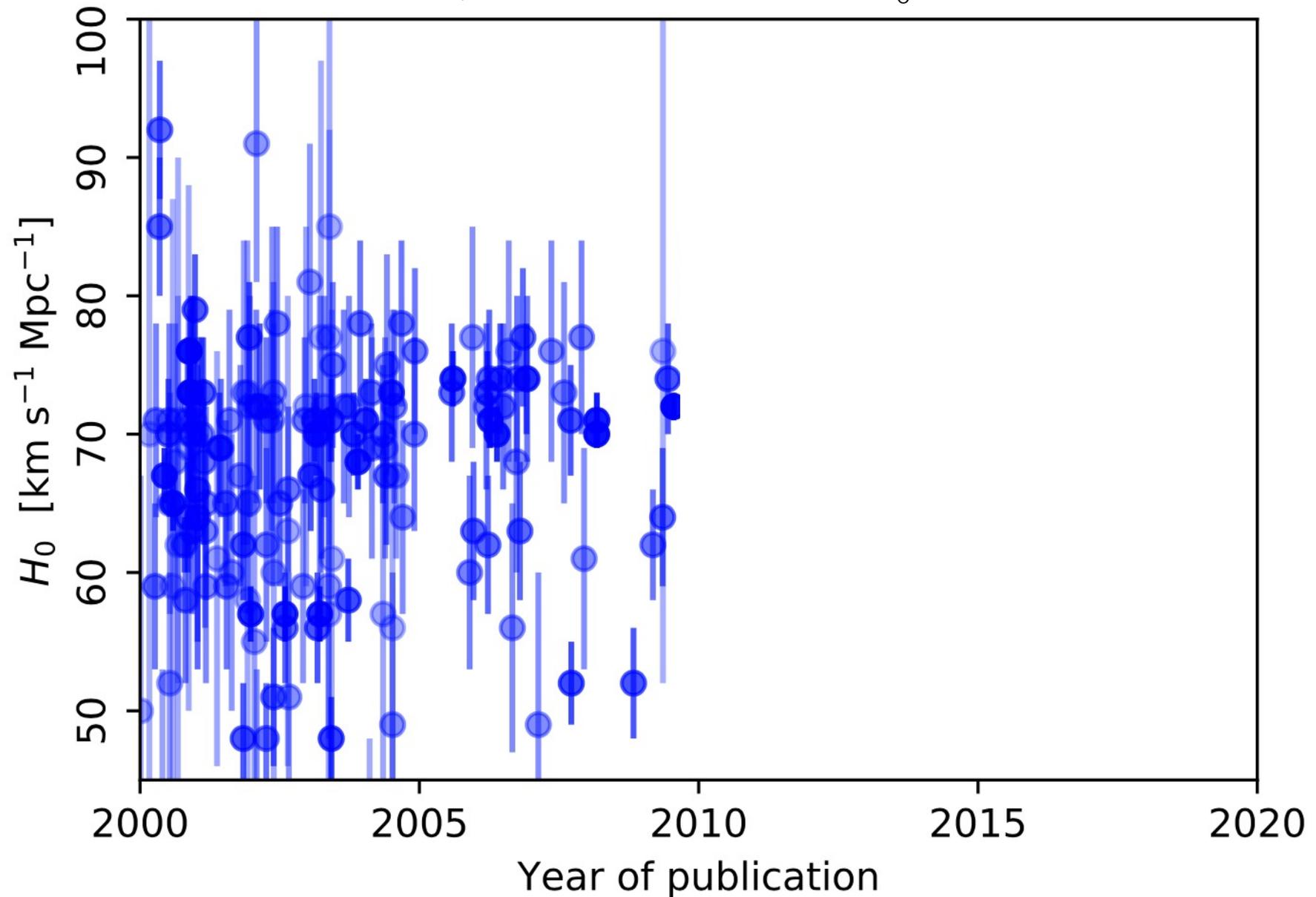
theory confronts data 2018



Planck Collaboration, 2018, 1

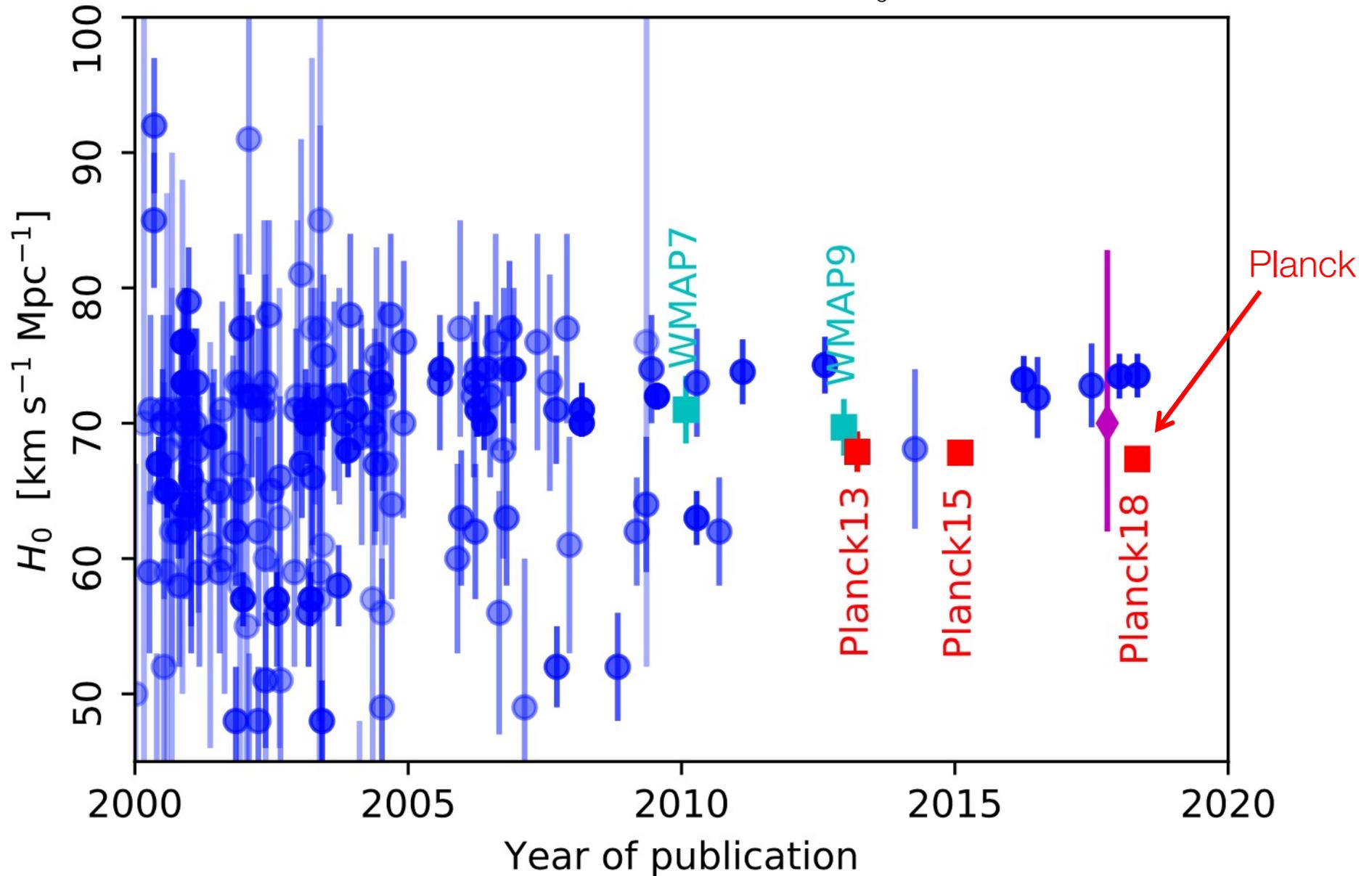
6 paramètres cosmologiques les plus précis

Ici, la constante de Hubble H_0



6 paramètres cosmologiques les plus précis

Ici, la constante de Hubble H_0



6 paramètres cosmologiques les plus précis

Parameter	confidence limits	
	<i>Planck</i> alone	<i>Planck</i> + BAO
$\Omega_b h^2$	0.02237 ± 0.00015	0.02242 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$	0.1200 ± 0.0012	0.11933 ± 0.00091
$100\theta_{MC}$	1.04092 ± 0.00031	1.04101 ± 0.00029
τ	0.0544 ± 0.0073	0.0561 ± 0.0071
$\ln(10^{10} A_s)$	3.044 ± 0.014	3.047 ± 0.014
n_s	0.9649 ± 0.0042	0.9665 ± 0.0038
H_0	67.36 ± 0.54	67.66 ± 0.42
Ω_Λ	0.6847 ± 0.0073	0.6889 ± 0.0056
Ω_m	0.3153 ± 0.0073	0.3111 ± 0.0056
$\Omega_m h^2$	0.1430 ± 0.0011	0.14240 ± 0.00087
$\Omega_m h^3$	0.09633 ± 0.00030	0.09635 ± 0.00030
σ_8	0.8111 ± 0.0060	0.8102 ± 0.0060
$\sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.5}$	0.832 ± 0.013	0.825 ± 0.011
z_{re}	7.67 ± 0.73	7.82 ± 0.71
Age[Gyr]	13.797 ± 0.023	13.787 ± 0.020
r_s [Mpc]	144.43 ± 0.26	144.57 ± 0.22
$100\theta_s$	1.04110 ± 0.00031	1.04119 ± 0.00029
r_{drag} [Mpc]	147.09 ± 0.26	147.57 ± 0.22
z_{eq}	3402 ± 26	3387 ± 21
k_{eq} [Mpc ⁻¹]	0.010384 ± 0.000081	0.010339 ± 0.000063
Ω_K	-0.0096 ± 0.0061	0.0007 ± 0.0019
Σm_ν [eV]	< 0.241	< 0.120
N_{eff}	$2.89^{+0.36}_{-0.38}$	$2.99^{+0.34}_{-0.33}$
$r_{0.002}$	< 0.101	< 0.106

6 paramètres cosmologiques

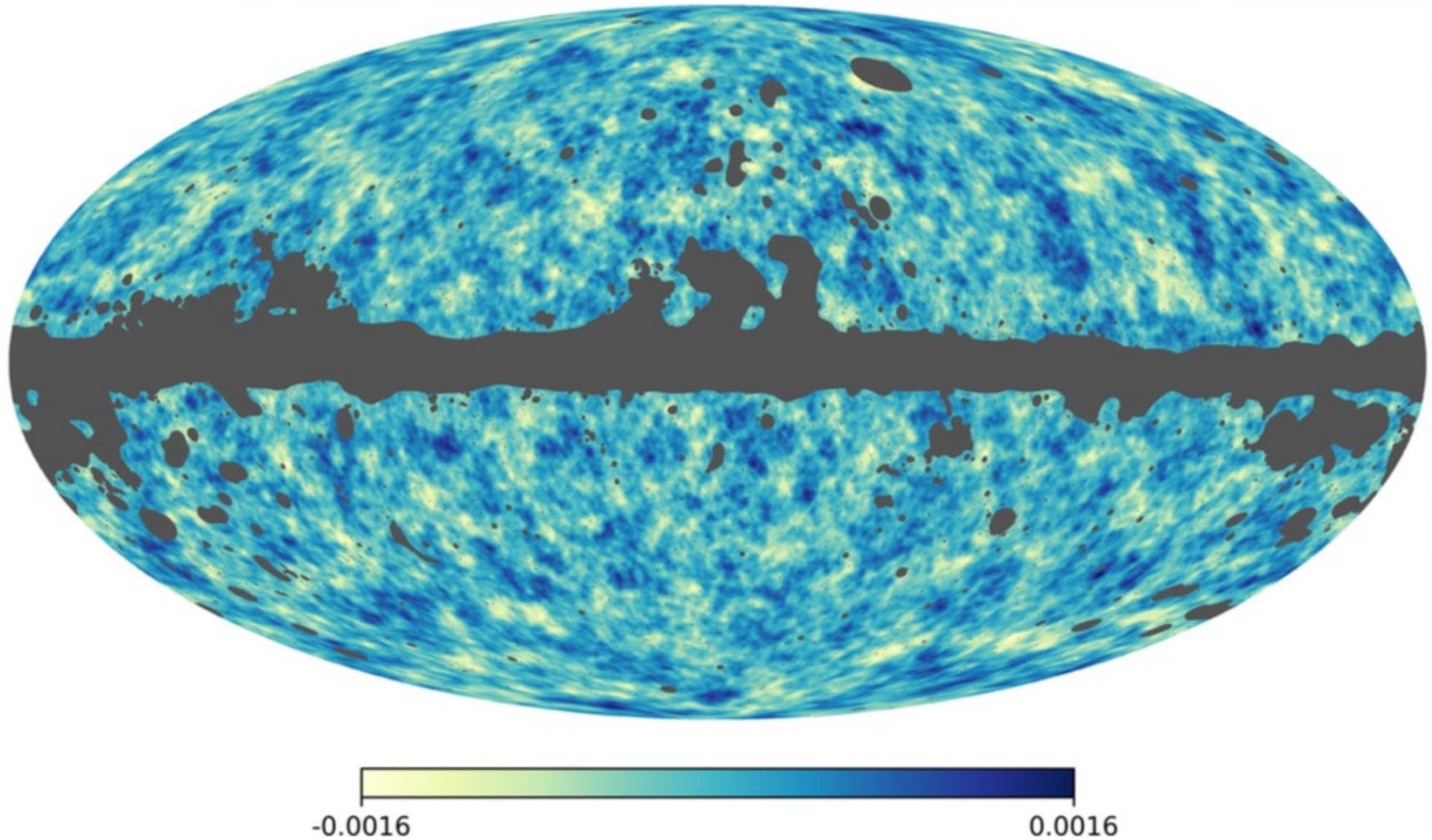
0.4 à 0.8% incertitude !

0.15% incertitude !

paramètres dérivés

Planck 2018

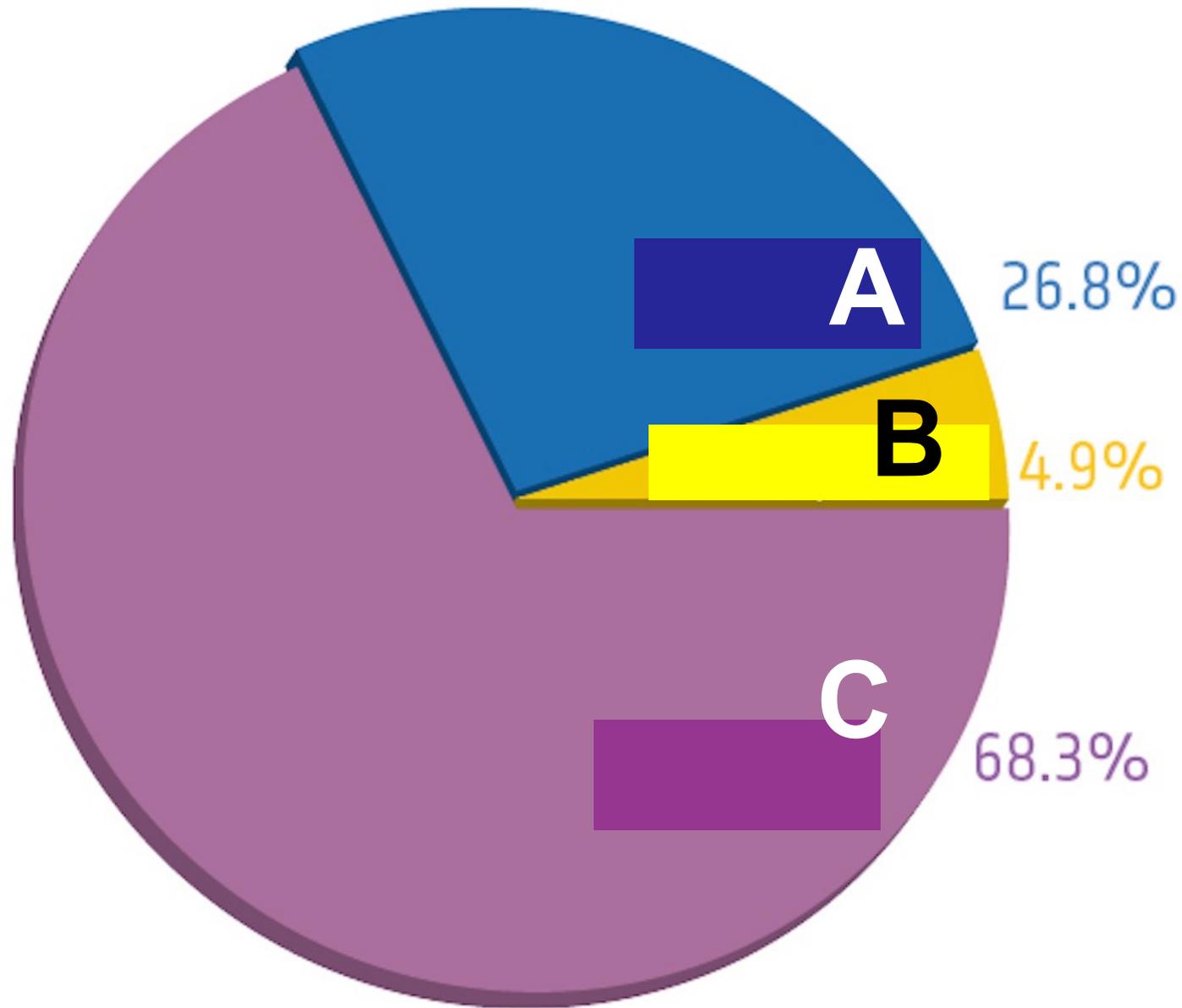
Planck all-sky map of the dark matter



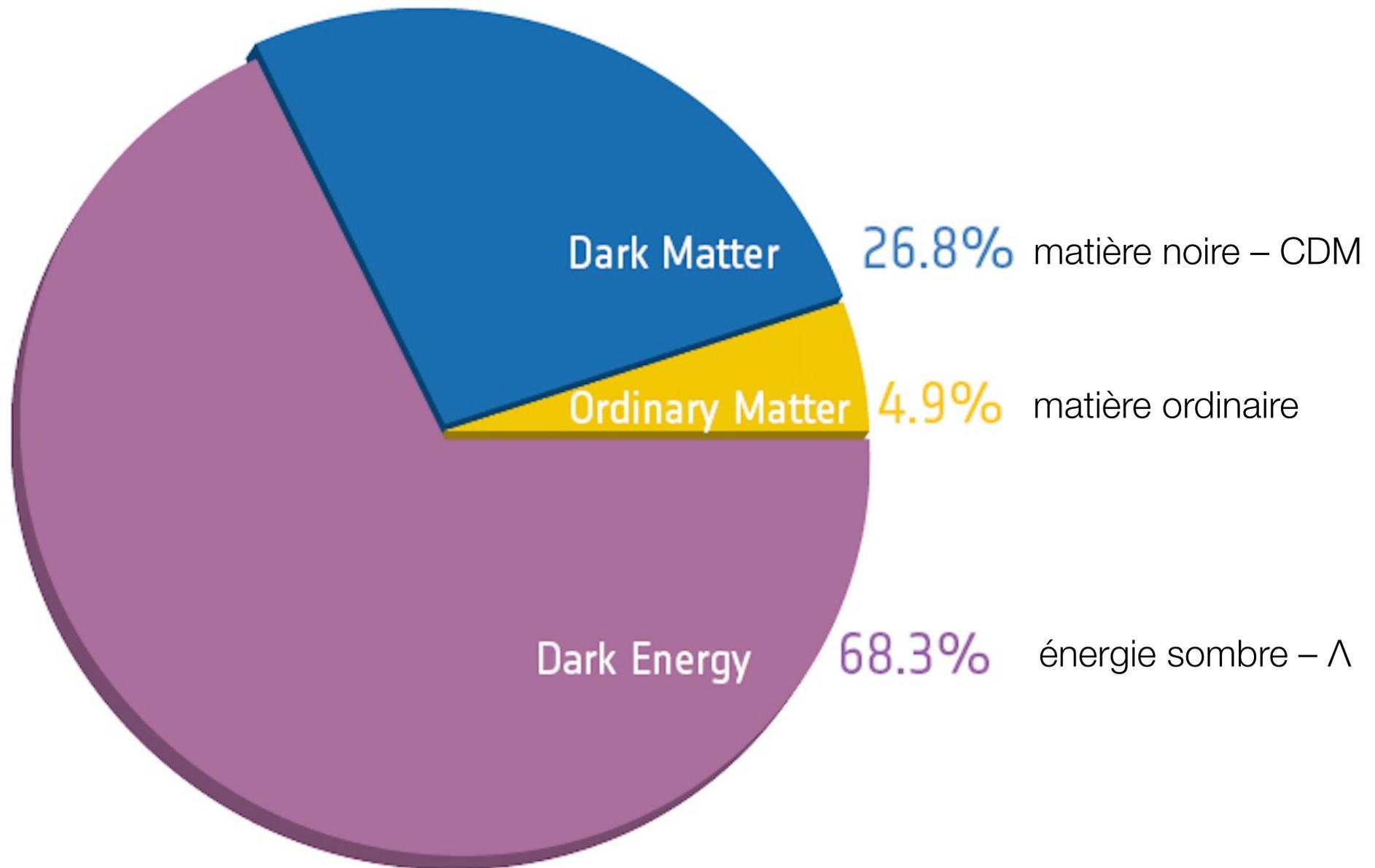
= Carte de la masse projetée sur la ligne de visée

Planck 2018, 1

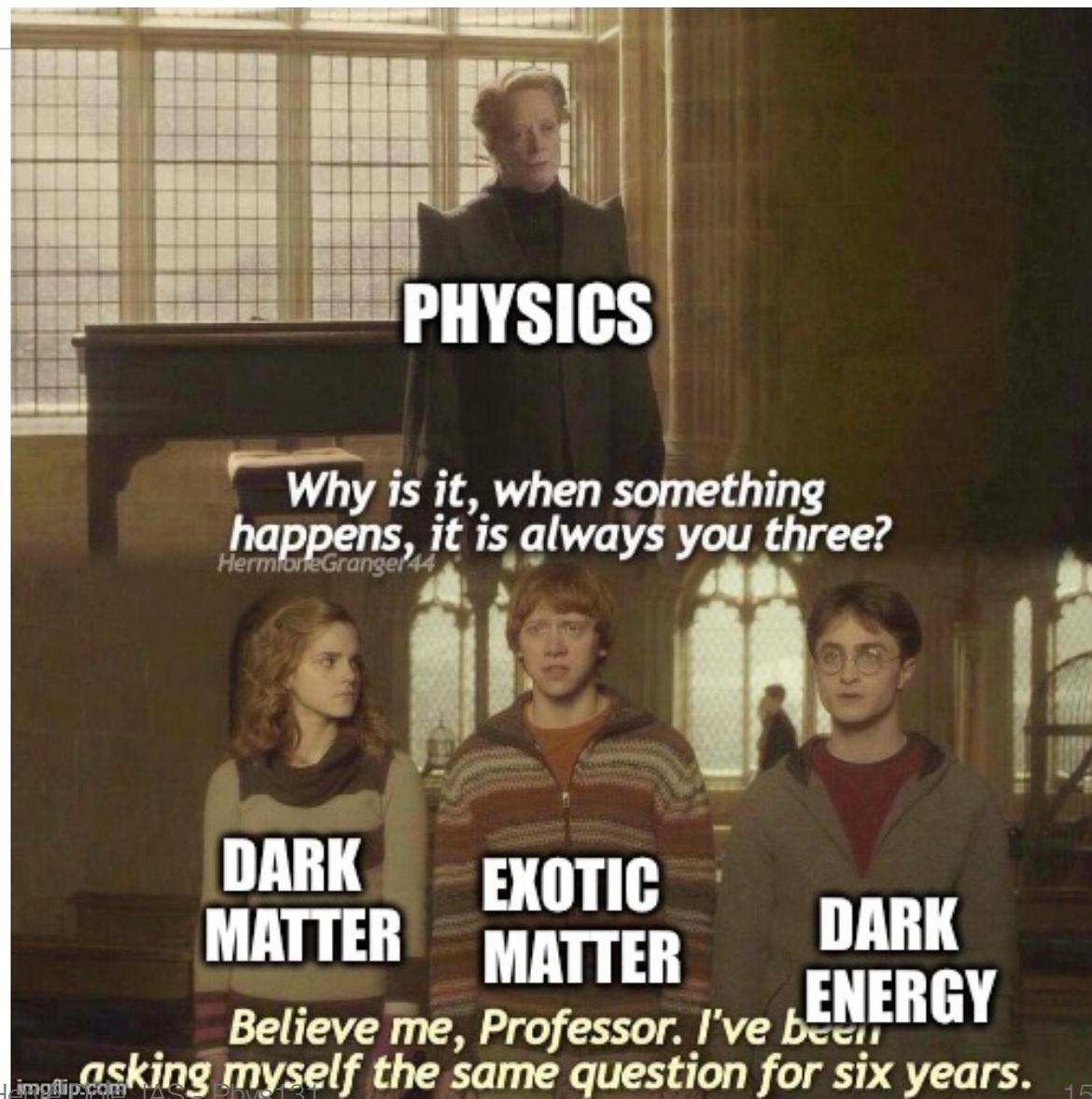
the dark universe – l'univers obscur



the dark universe – l'univers obscur

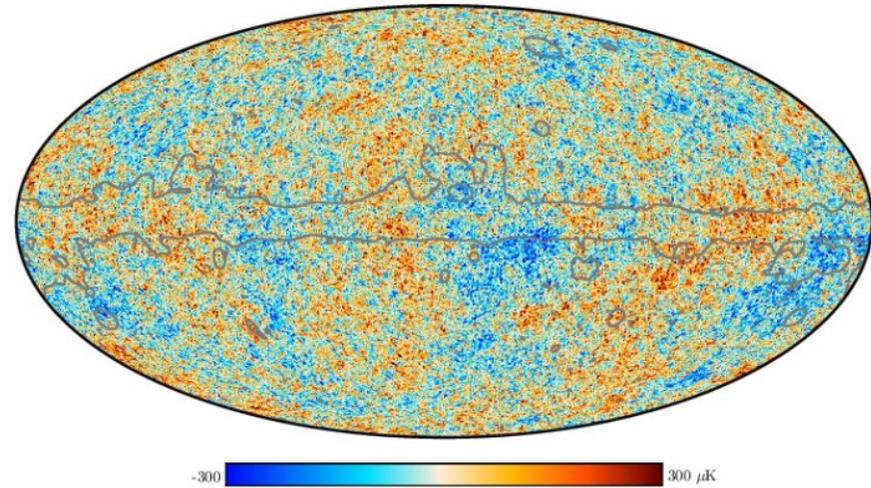


Dark components

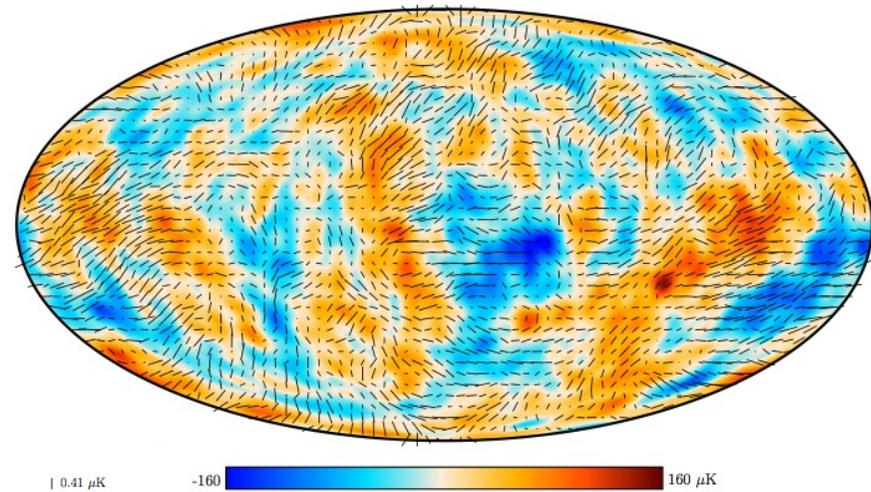


images Planck

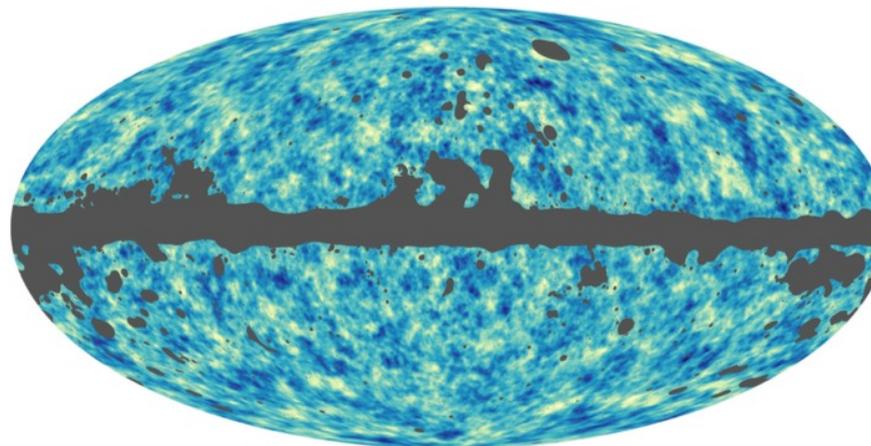
A



B



C



Planck Collaboration, 2018, 1

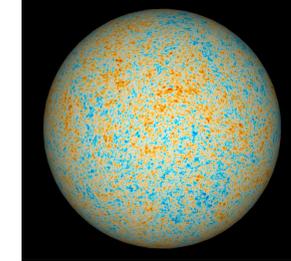
densité d'énergie – en fonction de l'échelle spatiale



Système Solaire

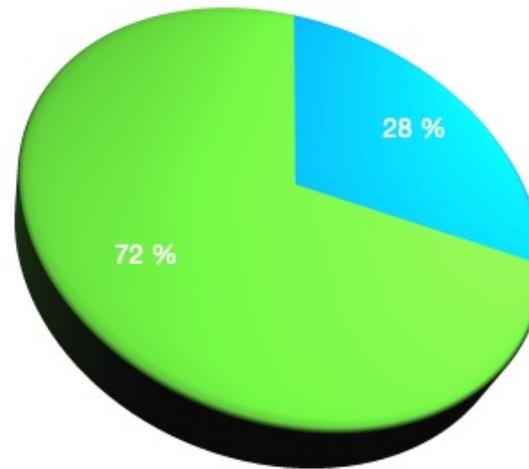
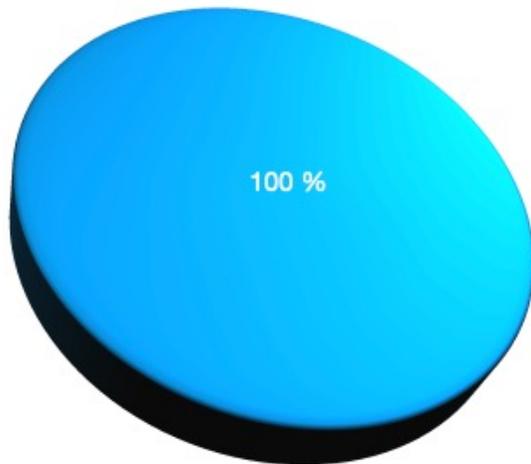


Voie Lactée, $R < 20 \text{ kpc}$

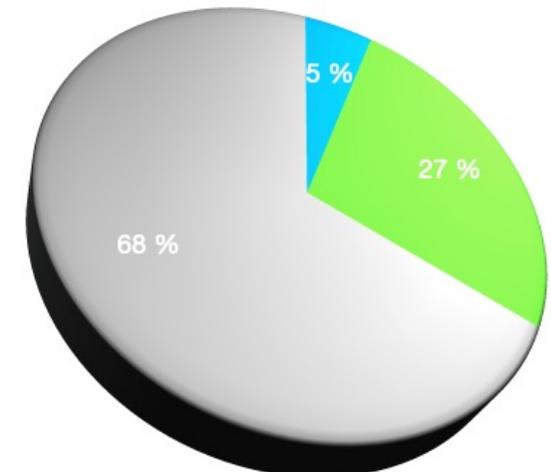


Univers / CMB

● Atomes ● Matière noire ● Energie sombre



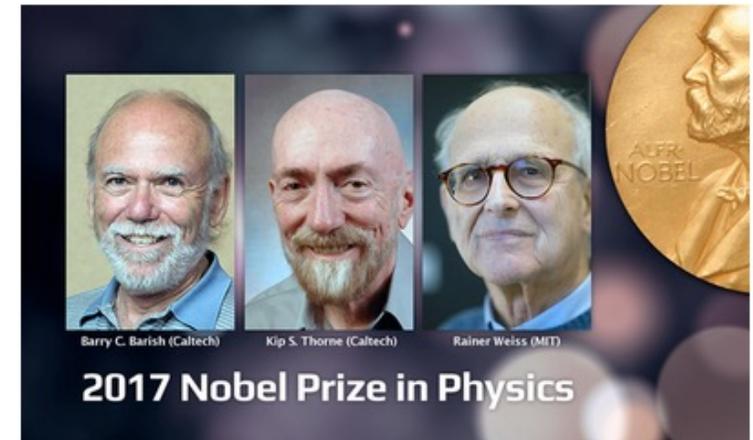
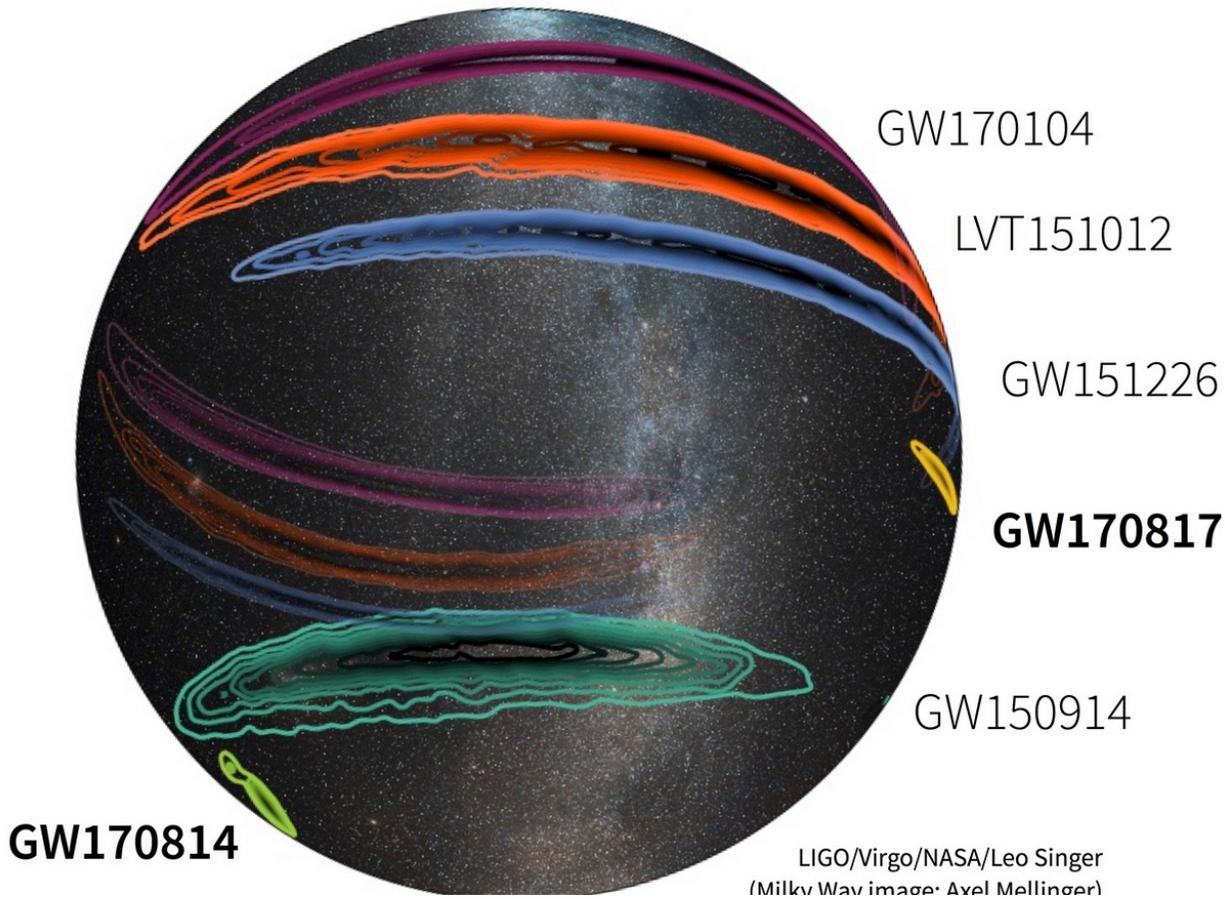
Posti & Helmi, 2019, A&A



Planck Collab., 2018

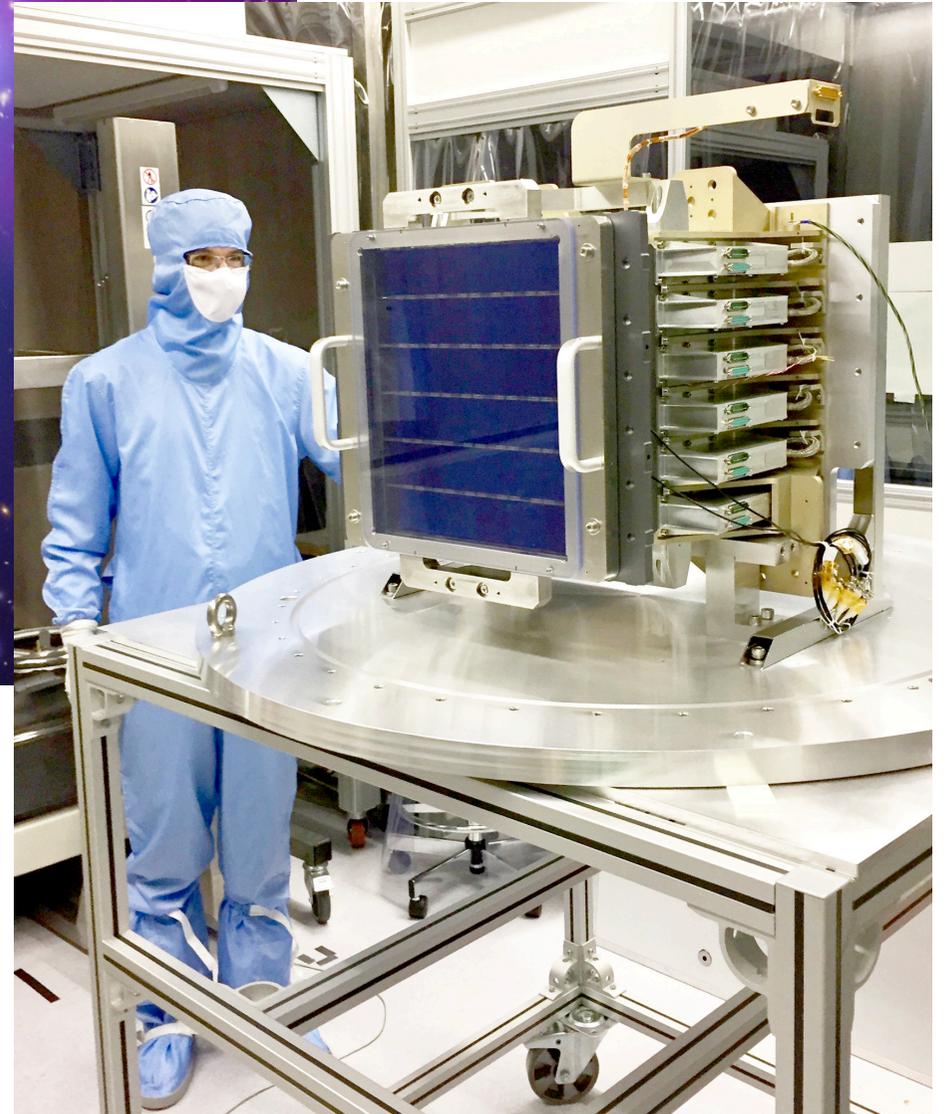
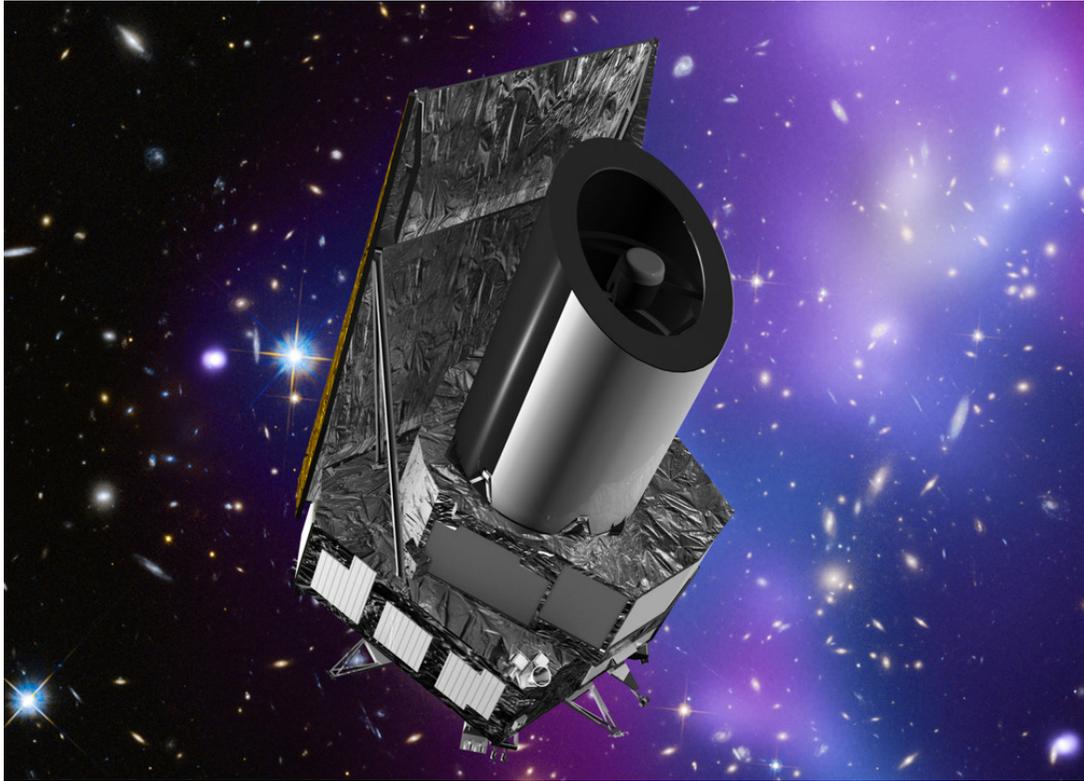
10. A new hope

Ondes gravitationnelles



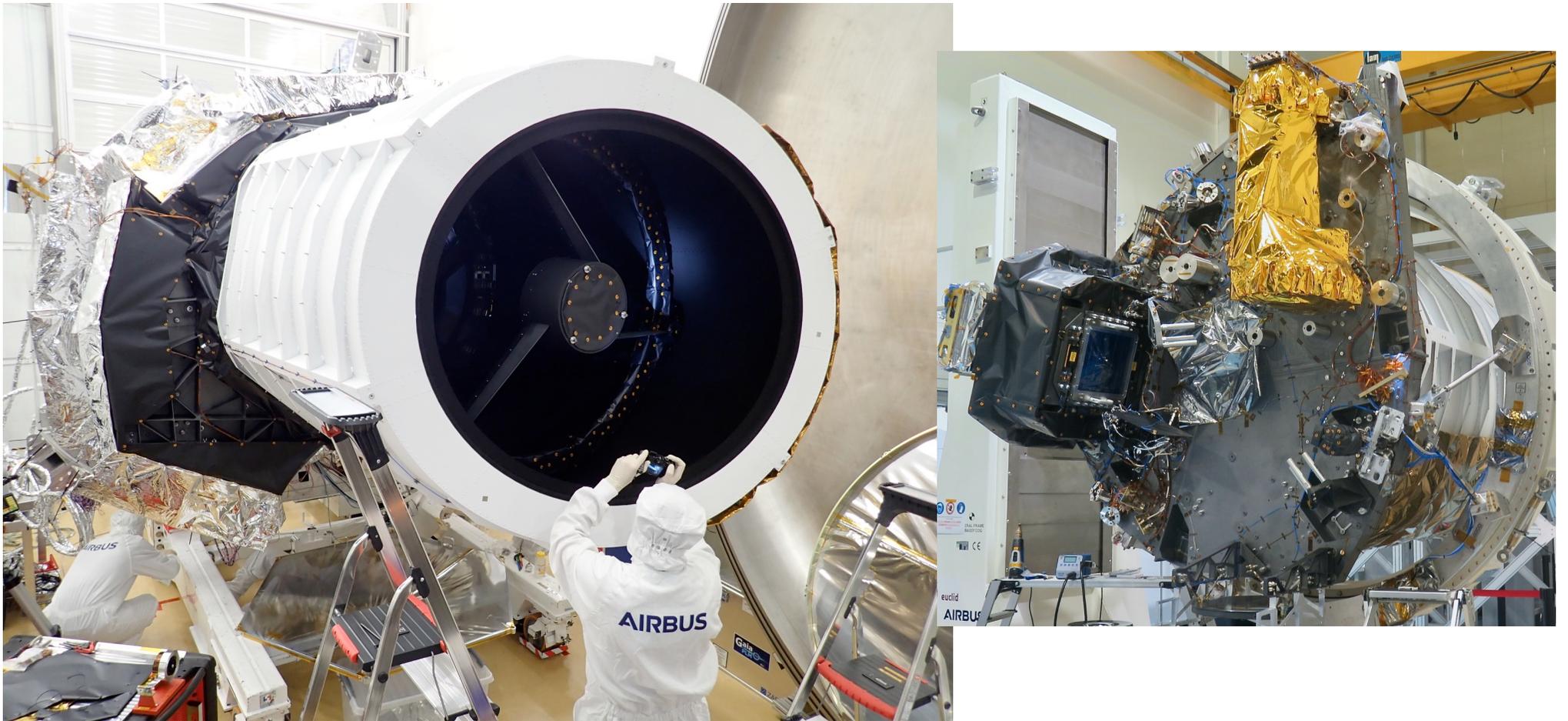
6. A new hope: Euclid

Mission européenne Euclid: 1^{er} juillet 2023



Matière noire
Énergie sombre

Euclid (ESA)



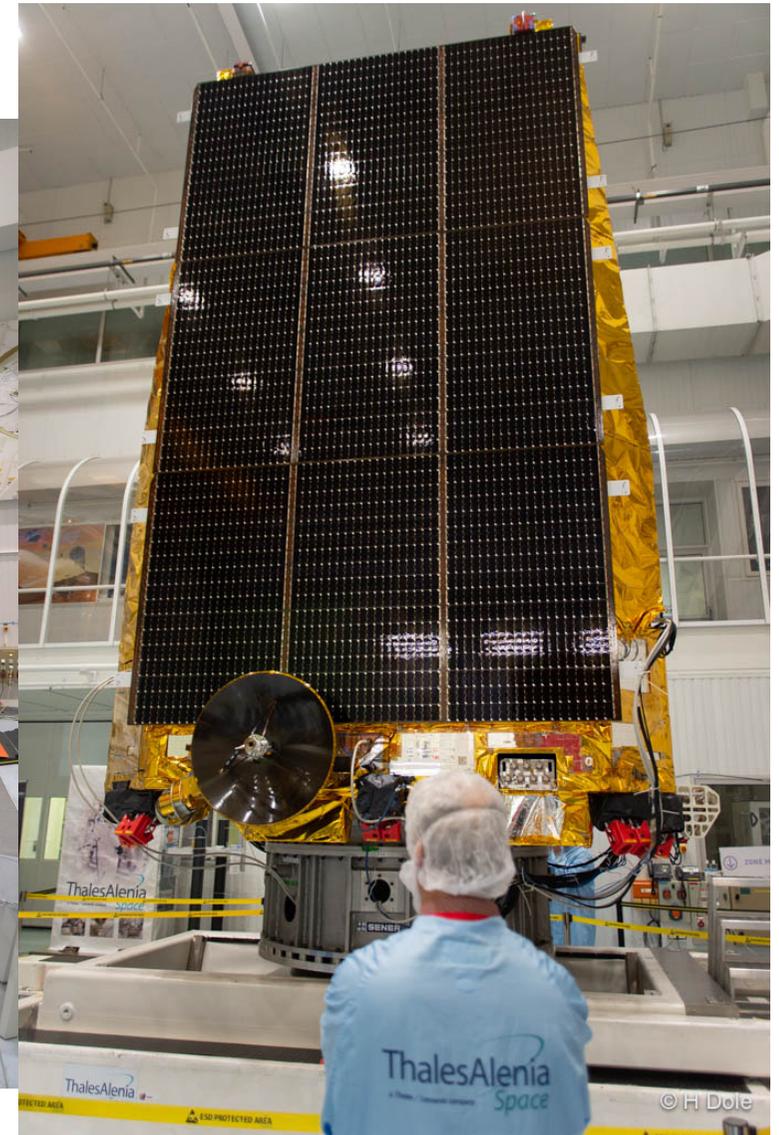
Euclid (ESA)



Euclid (ESA)



Thalès Alenia Space Cannes



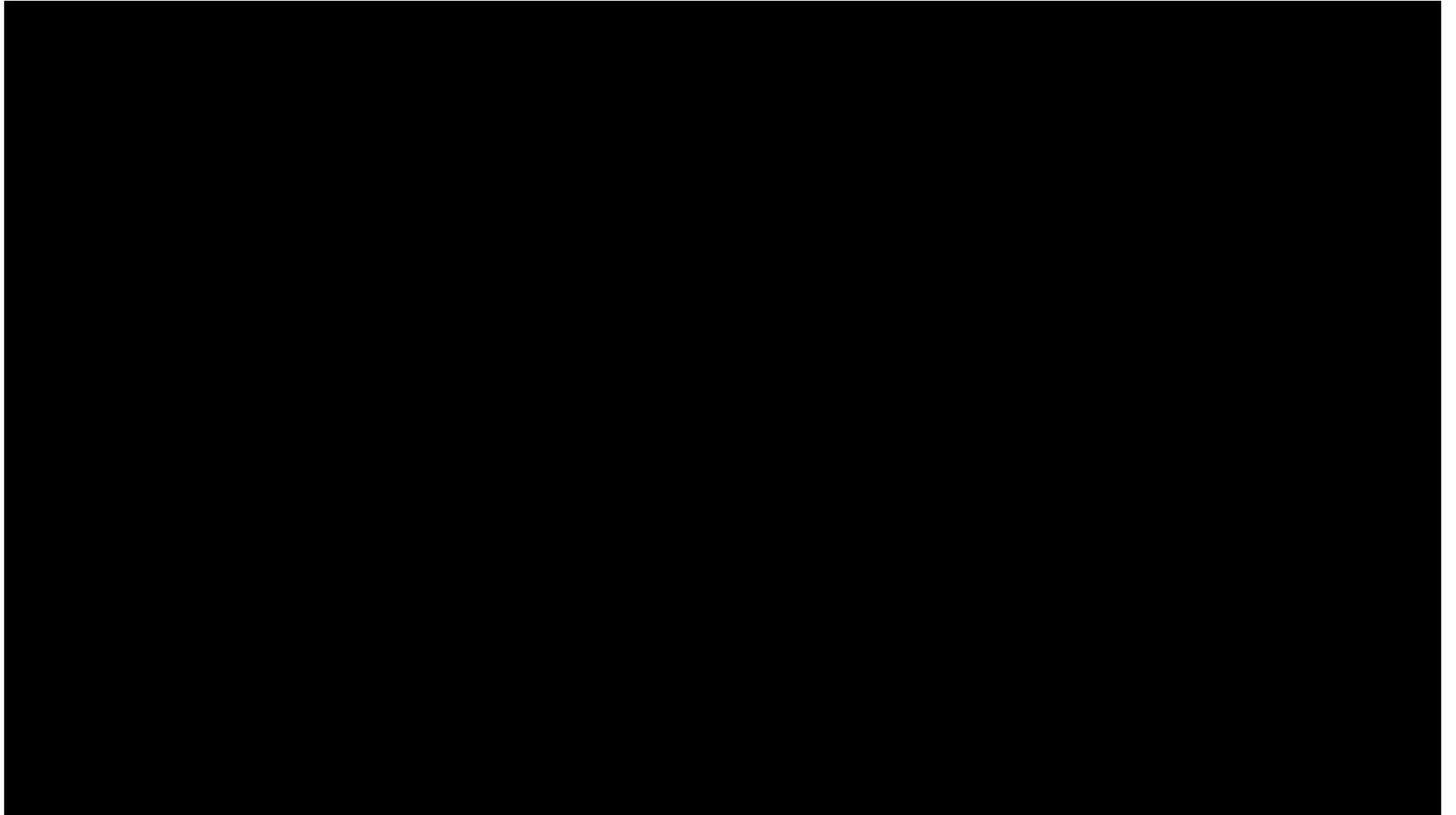
Euclid (ESA)



Thalès Alenia Space Cannes



Euclid (ESA)

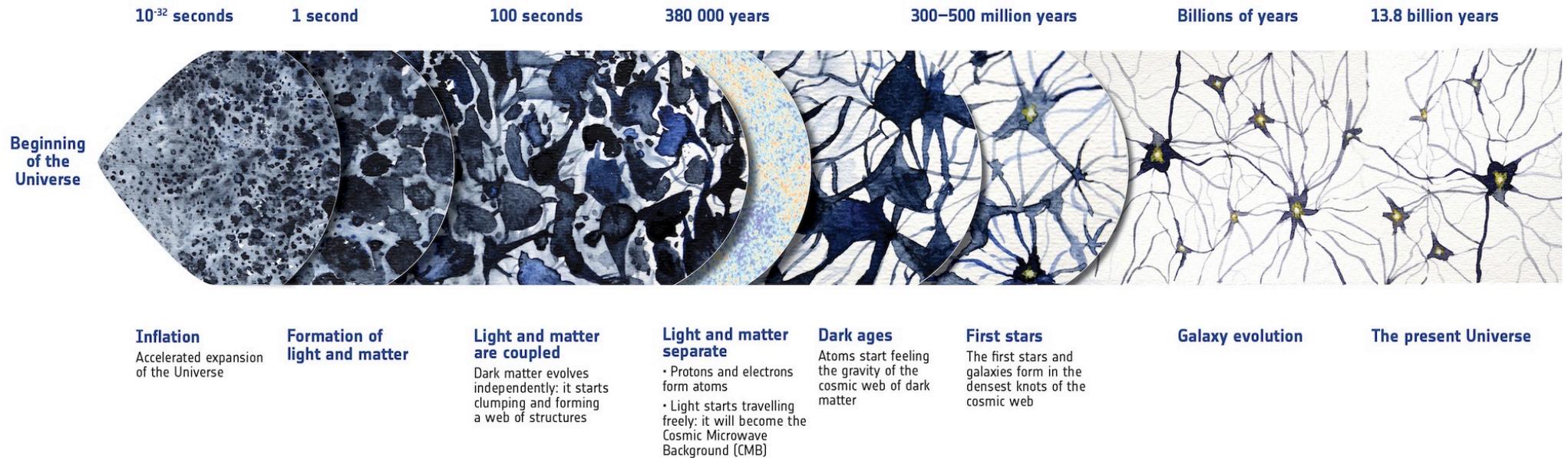






11. Retour sur les 3 piliers de la cosmologie

Histoire de l'Univers





10⁻³² seconds

1 second

100 seconds

380 000 years

300–500 million years

Billions of years

13.8 billion years

Beginning of the Universe



Inflation

Accelerated expansion of the Universe

Formation of light and matter

Light and matter are coupled

Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures

Light and matter separate

• Protons and electrons form atoms
• Light starts travelling freely; it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)

Dark ages

Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter

First stars

The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web

Galaxy evolution

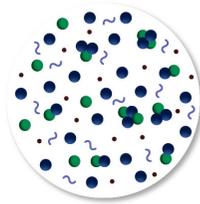
The present Universe



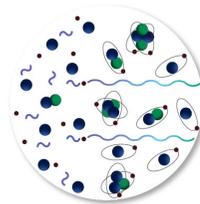
• *Tiny fluctuations: the seeds of future structures*
• *Gravitational waves?*



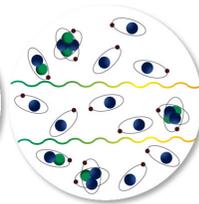
Frequent collisions between normal matter and light



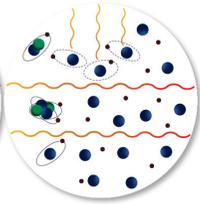
As the Universe expands, particles collide less frequently



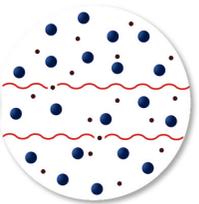
Last scattering of light off electrons
→ **Polarisation**



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form



Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe



Light can interact again with electrons
→ **Polarisation**



10⁻³² seconds

1 second

100 seconds

380 000 years

300–500 million years

Billions of years

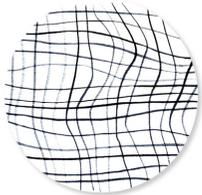
13.8 billion years

Beginning of the Universe



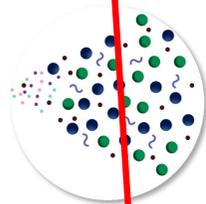
Inflation

Accelerated expansion of the Universe



- Tiny fluctuations: the seeds of future structures
- Gravitational waves?

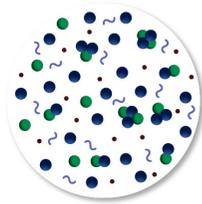
Formation of light and matter



Frequent collisions between normal matter and light

Light and matter are coupled

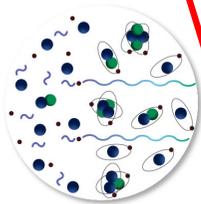
Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures



As the Universe expands, particles collide less frequently

Light and matter separate

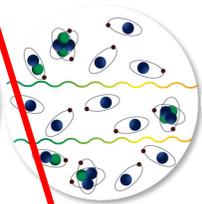
- Protons and electrons form atoms
- Light starts traveling freely: it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)



Last scattering of light off electrons → **Polarisation**

Dark ages

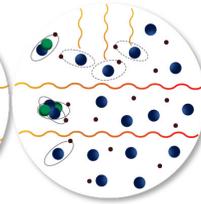
Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form

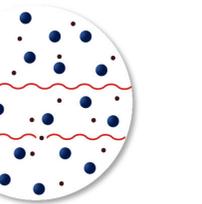
First stars

The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web



Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe

Galaxy evolution



Light can interact again with electrons → **Polarisation**

The present Universe

2- Abondance des éléments légers (H, He) (40's, 50's)

3- Fond cosmologique CMB (1965)

1- Récession des galaxies: Univers en expansion (1929)

Les 3 piliers de la cosmologie

+ relativité générale, gravitation, physique

2- Abondance
des éléments
légers (H, He)
(40's, 50's)

3- Fond
cosmologique
CMB (1965)

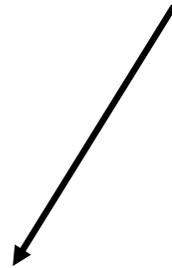
1- Récession
des galaxies:
Univers en
expansion
(1929)

Le modèle cosmologique actuel

Λ CDM

Le modèle cosmologique actuel

Λ CDM



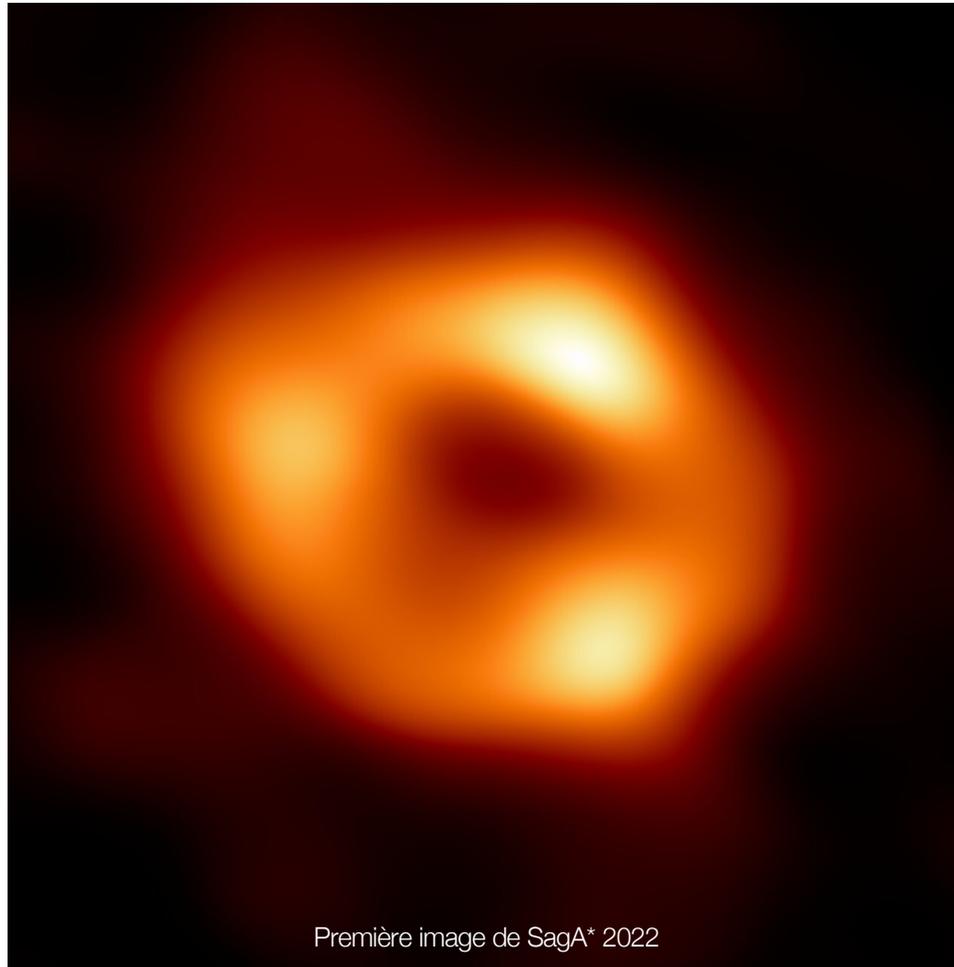
Λ : constante cosmologique
~ énergie sombre ->
expansion accélérée



CDM: Cold Dark Matter
Matière noire froide

Extra 1. Trous noirs

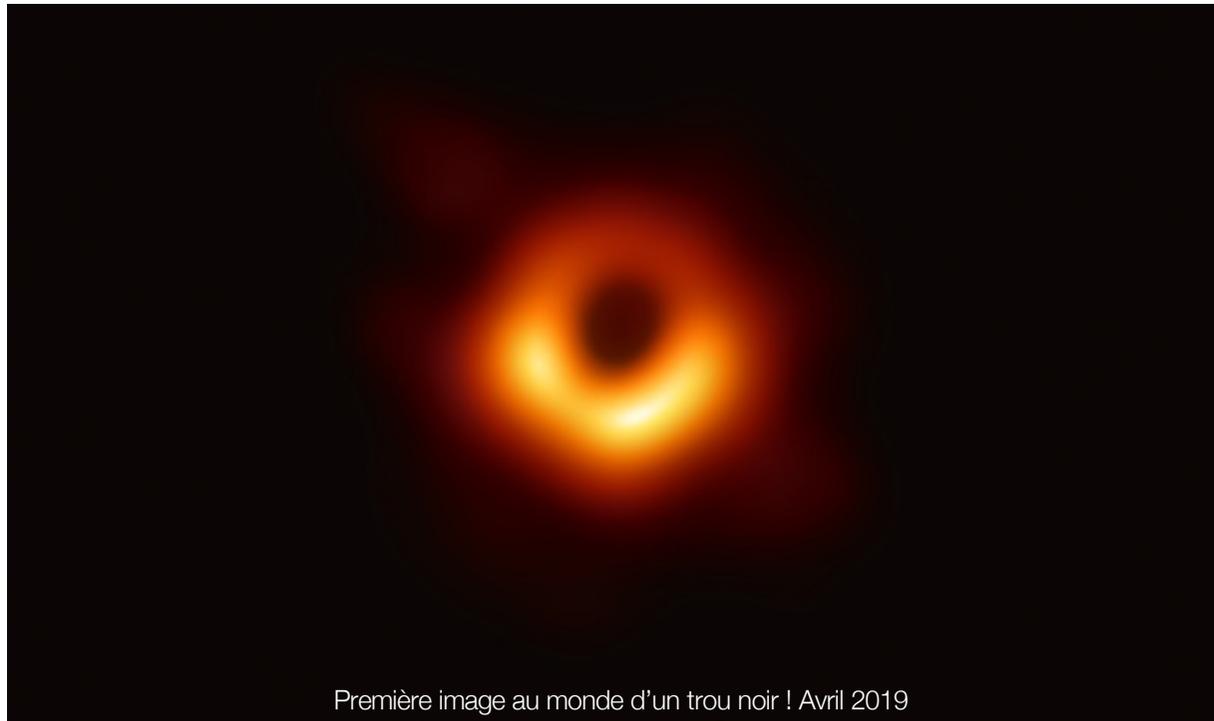
6. trou noir au centre de notre galaxie



Première image de SagA* 2022

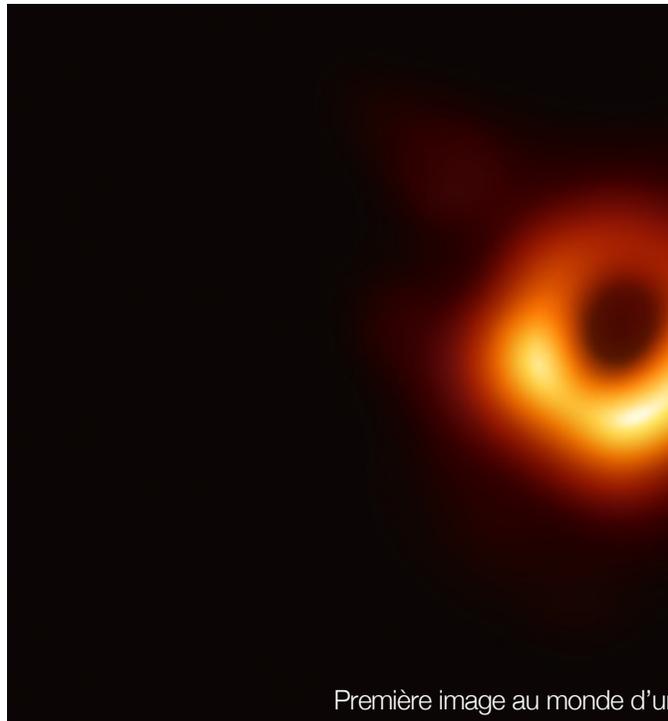
EHT 2022

6. trou noir au centre de la galaxie M87



EHT 2019

6. trou noir au centre de la galaxie M87



Ben Halpern 🤔🔵
@bendhalpern [Follow](#)

1969: Margaret Hamilton alongside the code that got us to the moon
2019: Katie Bouman alongside the data that got us to the black hole

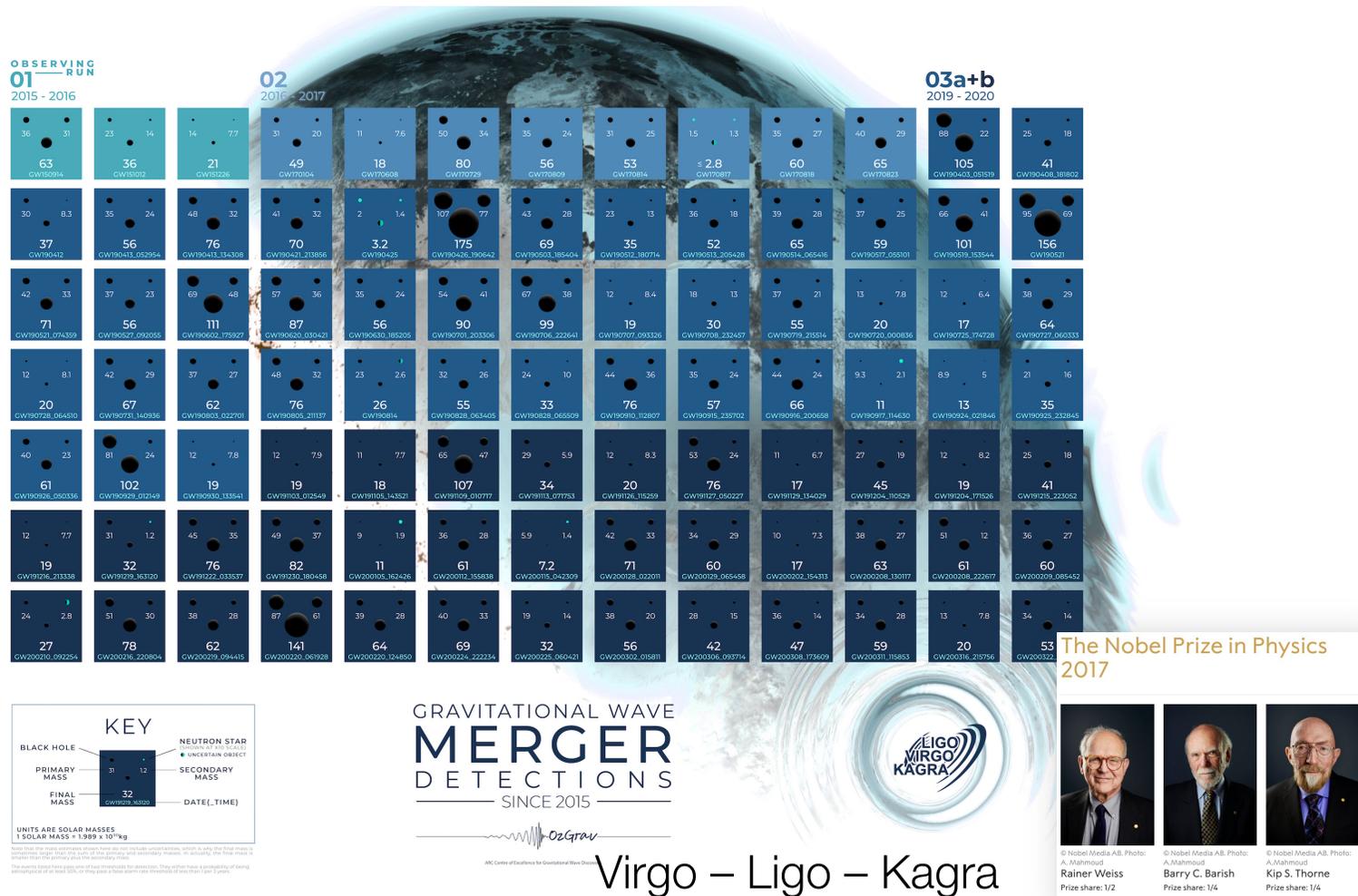
10:11 PM - 10 Apr 2019

168,551 Retweets 431,483 Likes

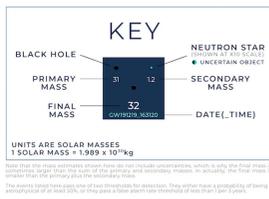
932 169K 431K

EHT 2019

6b. ondes gravitationnelles



6b. ondes gravitationnelles



GRAVITATIONAL WAVE
MERGER
DETECTIONS
SINCE 2015



Virgo – Ligo – Kagra

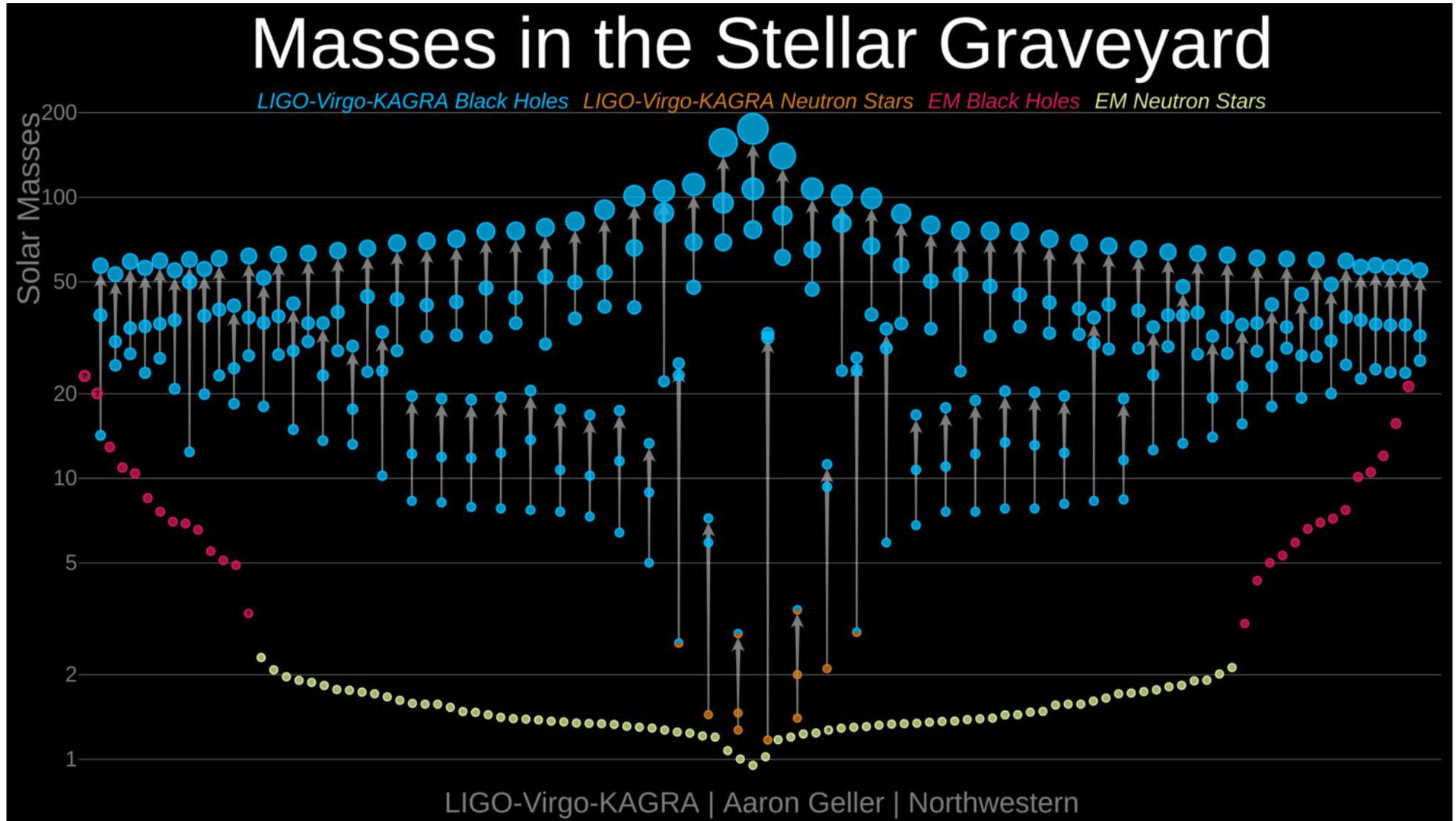
The Nobel Prize in Physics 2017

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Rainer Weiss
Prize share: 1/2

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Barry C. Barish
Prize share: 1/4

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4

6b. ondes gravitationnelles

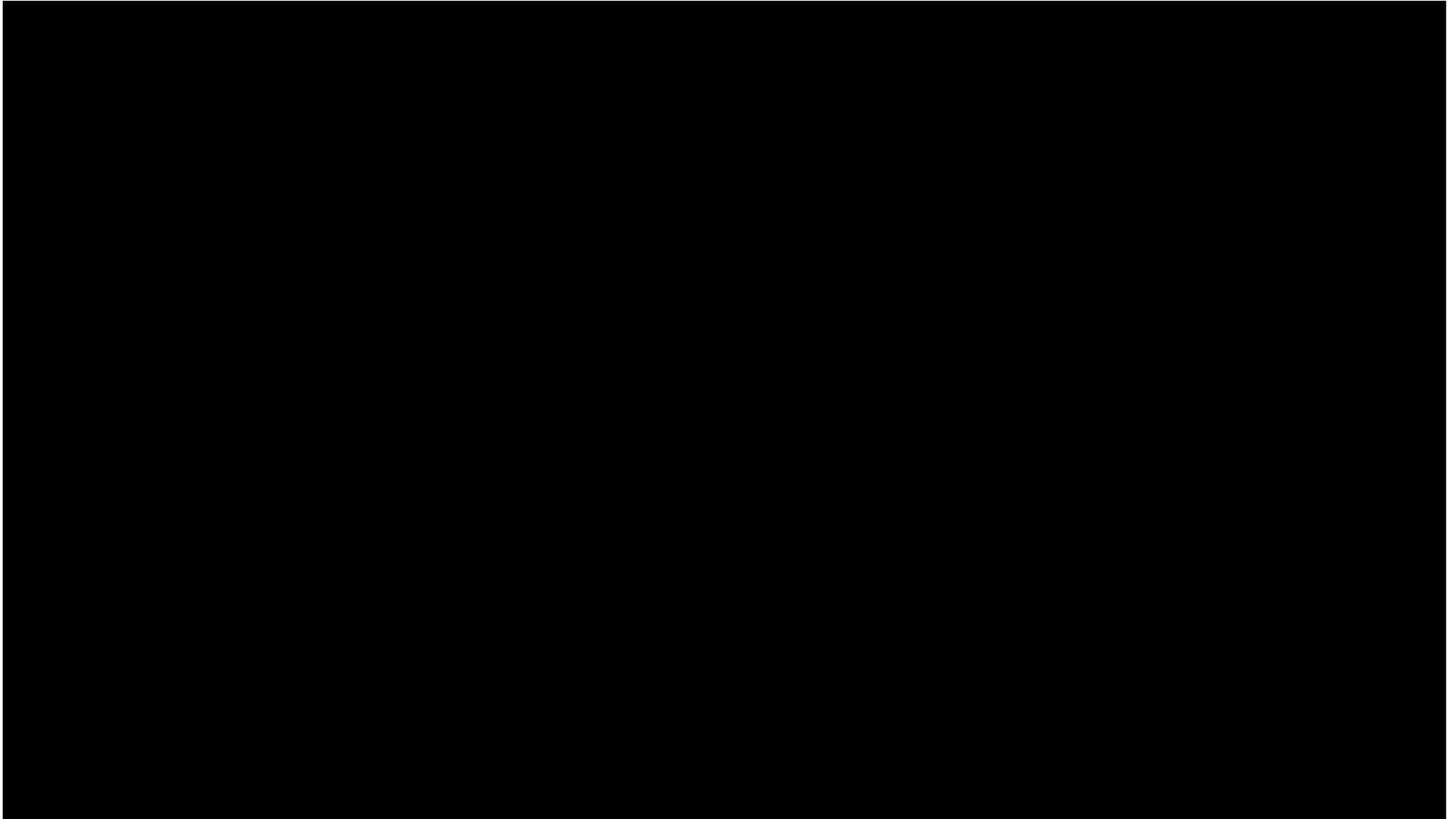


6c. « sons » des trous noirs en coalescence

Fréquence du signal ->

Temps ->

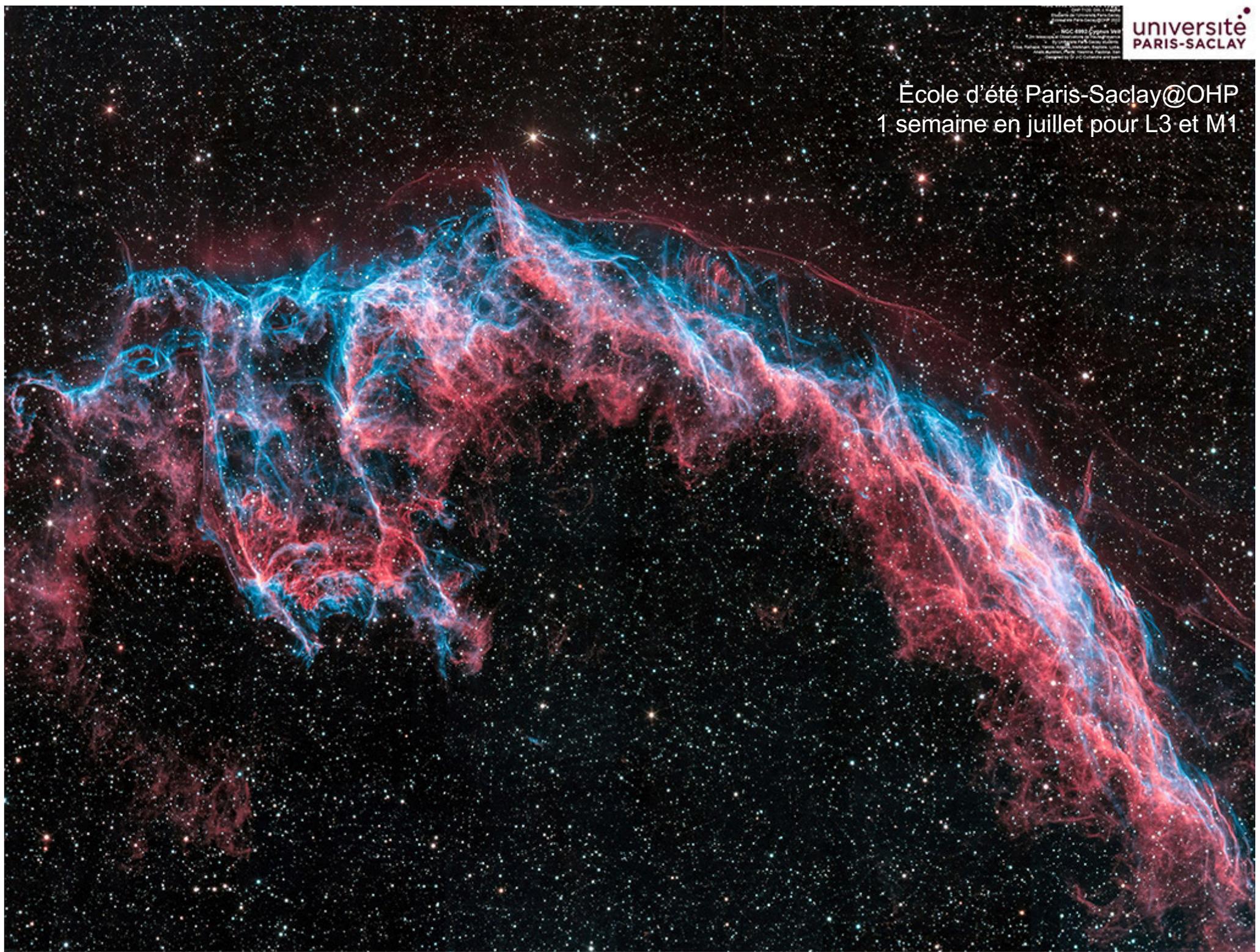
6c. « sons » des trous noirs en coalescence



Extra 2.

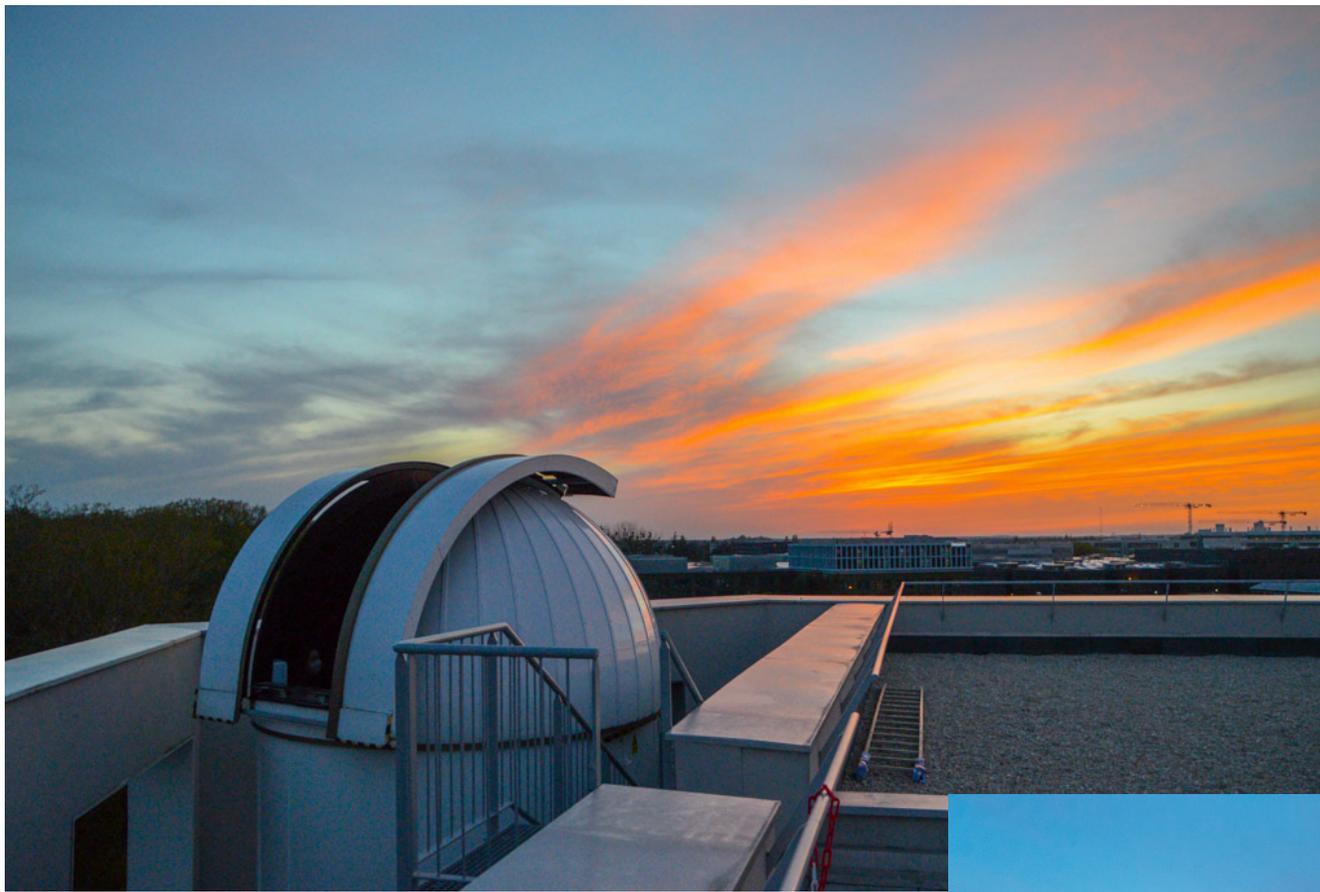
Séquence: observatoires astronomiques

École d'été Paris-Saclay@OHP
1 semaine en juillet pour L3 et M1



École d'été Paris-Saclay@OHP 1 semaine en juillet pour L3 et M1



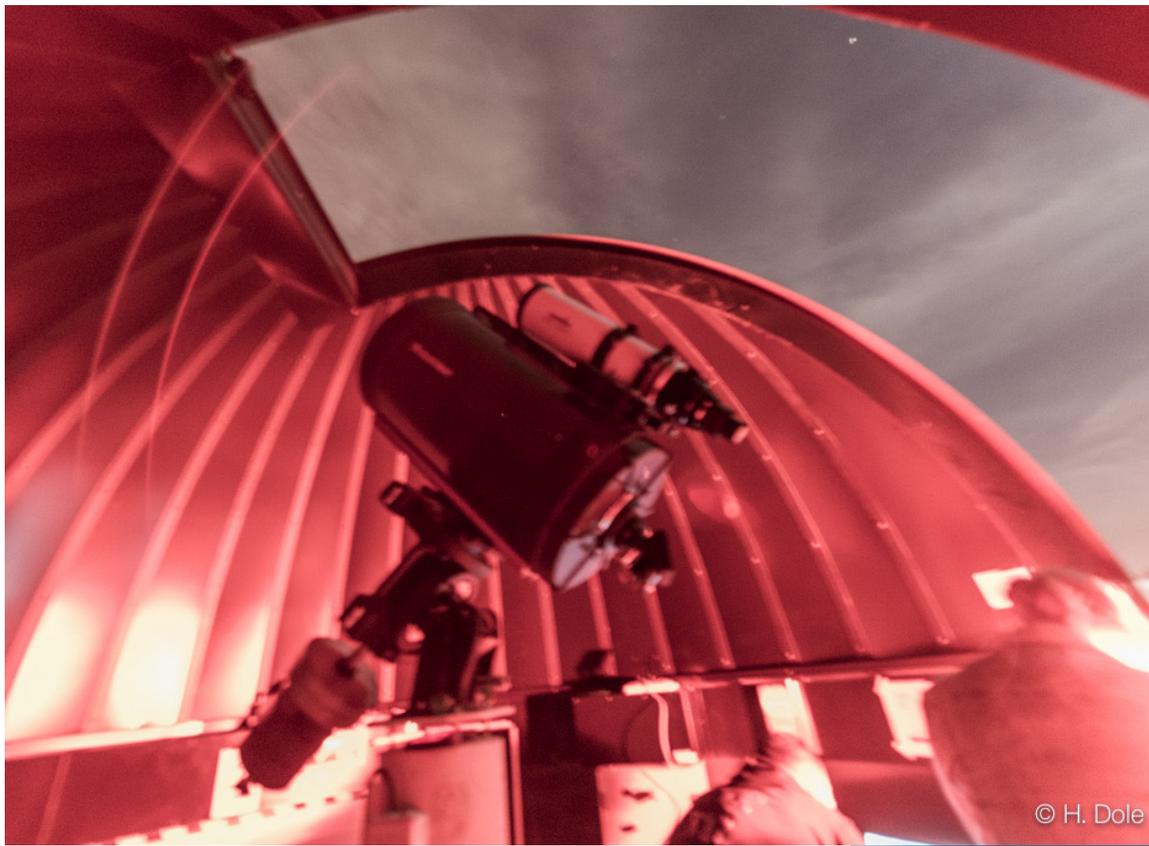


Coupole d'astrophysique
Rooftop du hbar

Accessible avec ALCOR
et TP de M1

Celestron 14 de 35cm
Instrumentation de pointe:
CCD, spectromètre





Coupole d'astrophysique
Rooftop du hbar

Accessible avec ALCOR
et TP de M1

Celestron 14 de 35cm
Instrumentation de pointe:
CCD, spectromètre

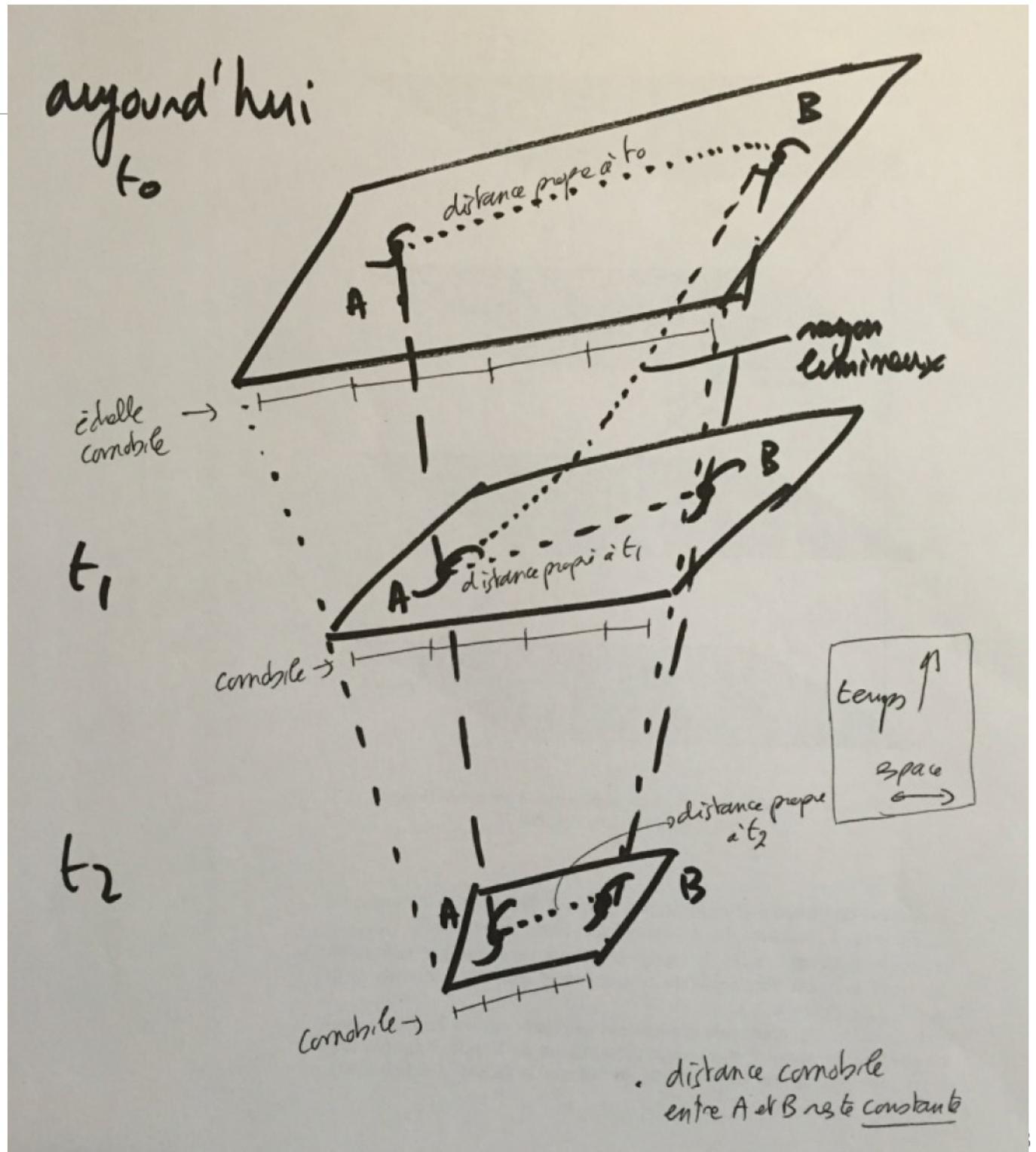
Alcor.asso@gmail.com



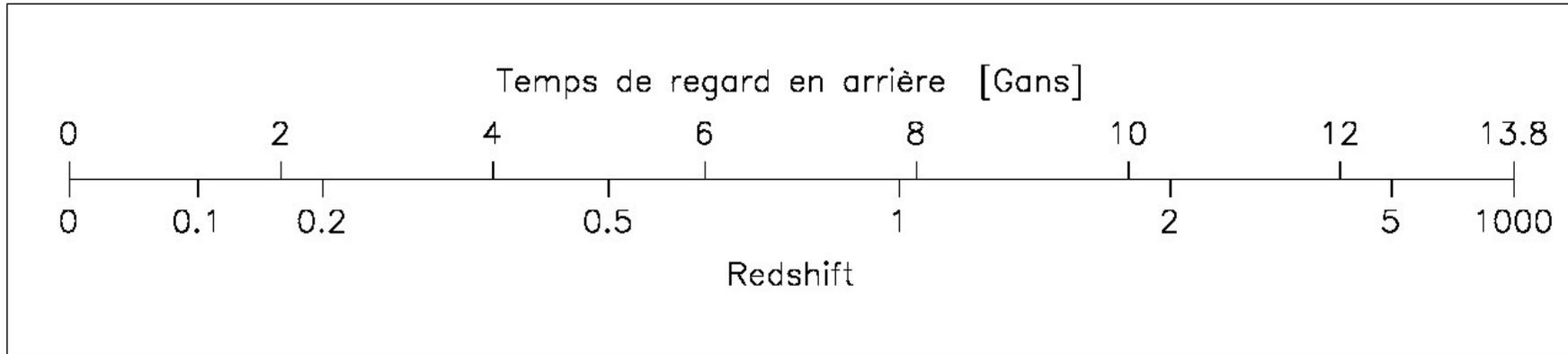
Extra 3. Éléments de cosmologie

- Métrique, espace-temps, homogène et isotrope
- Métrique de l'espace-temps: euclidien et courbe
- Facteur d'échelle $a(t)$
- Coordonnées comobiles
- Redshift et facteur d'échelle
- Redshift et époque cosmique
- Paramètre de Hubble

Coordonnées comobiles

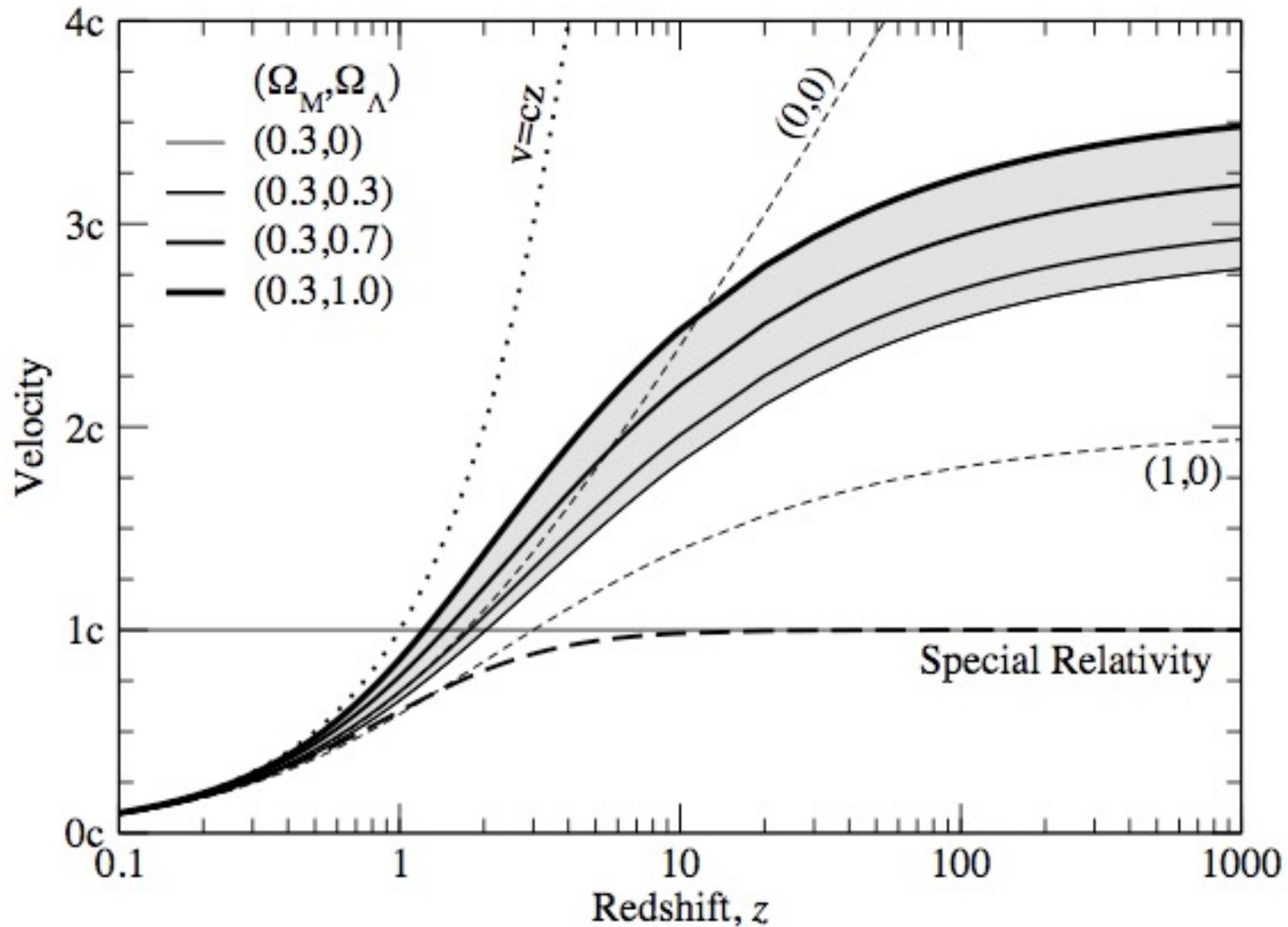


Redshift et époque cosmique



Valable pour les paramètres cosmologiques de Planck 2015

Loi de Hubble & Redshift



Davis & Lineweaver, 2003, astro-ph/0310808

Résumé (1)

- l'astrophysique
 - est une science
 - aspects observationnels et théoriques; confrontation des deux.
 - a des postulats:
 - Univers intelligible ; Lois de la physique valables partout ;
 - a pour objet l'étude physique des propriétés, de la structure et de l'évolution des objets célestes
- distances dans l'univers
 - Techniques, difficultés
 - connaître les ordres de grandeur (distances, âge, Mpc, ..)

Résumé (2)

- Pourquoi la nuit est-elle noire ?
 - 1. Finitude de c + univers a un âge fini (expansion): existence d'un horizon. En fait explication insuffisante.
 - 2. Parce que l'univers est en expansion: décalage vers le rouge. La nuit n'est en fait pas noire: rayonnement diffus cosmologique à 2.75K.

Résumé (3)

- longueurs d'ondes du rayonnement
 - rayons gamma, X, UV, visible, IR, submm, radio
 - chaque photon émis trace le milieu physique qui lui a donné naissance (en particulier, la température)
 - loi du corps noir importante
 - loi du déplacement de Wien
 - intérêt d'observer à plusieurs longueurs d'ondes

Résumé (4)

- 3 Piliers de la cosmologie contemporaine
 - Expansion de l'univers
 - Hubble dans les années 20
 - Loi de Hubble
 - Univers en expansion => il était plus dense et chaud dans le passé
 - Cf détente de Joule: gaz détendu se refroidit => Univers en expansion se refroidit
 - Abondance des éléments légers
 - Importance de la nucléosynthèse primordiale
 - Accord entre théorie et observations
 - Rayonnement diffus cosmologique
 - Rayonnement prédit et trouvé

résumé des connaissances actuelles

scénario du Big Bang

- Univers primordial: dense et chaud
- Univers en expansion
 - Avec épisode d'inflation au début
 - Expansion accélérée aujourd' hui
- Présence d'un rayonnement isotrope de corps noir
- Abondance des éléments légers
 - Nucléosynthèse primordiale des 3 premières minutes

le fond cosmologique

- Rayonnement isotrope
- Corps noir $T=2.725\text{K}$
- Dernière surface de diffusion, $z=1100$, quand $T\sim 3000\text{K}$
- Infimes fluctuations (10^{-5}): graines des grandes structures d' aujourd' hui (amas de galaxies)
- **histoire de l'Univers jeune**

(parmi) les grandes questions

évolution de notre Univers

- Comment s'est déroulée l'inflation ?
- Qu'est-ce que l'énergie noire ?
- Comment évolue-t-elle avec le temps ?
- Qu'est-ce que la matière noire ?

évolution des structures

- Comment se forment les premières galaxies ?
- Comment a eu lieu la réionisation ?
- Comment s'agrègent les amas de galaxies ?
- Comment les galaxies se forment-elles dans les halos de matière noire ?



université
PARIS-SACLAY

