

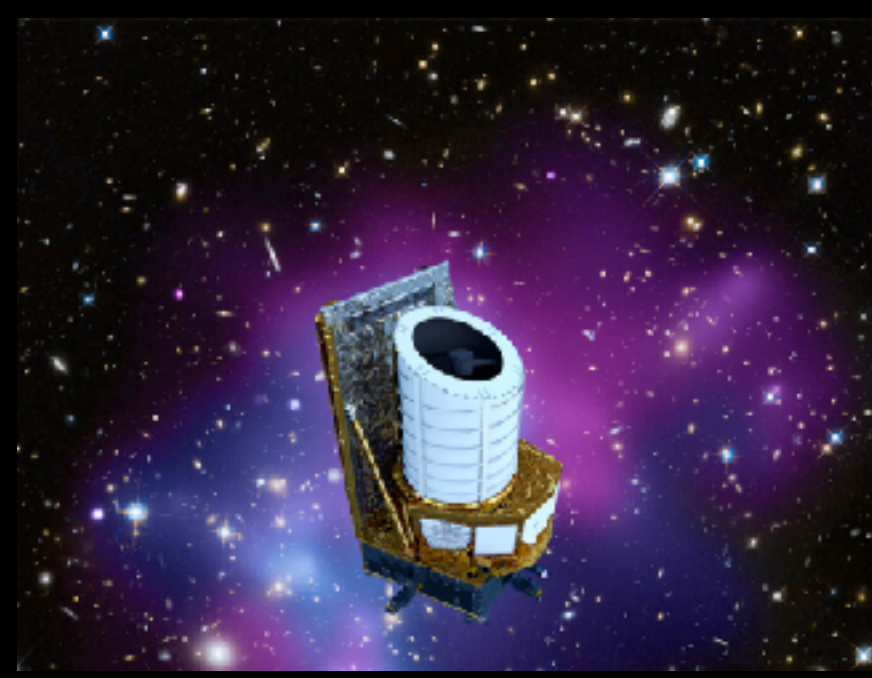


Sébastien Clesse

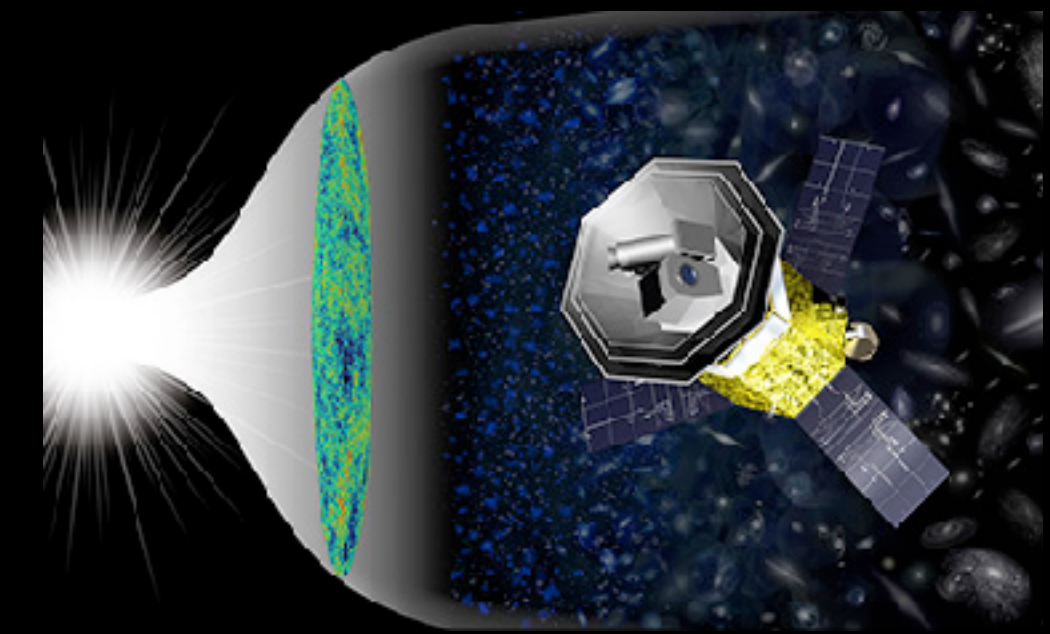
Service de Physique Théorique,
Université Libre de Bruxelles (ULB)



L'évolution et les mystères de l'Univers



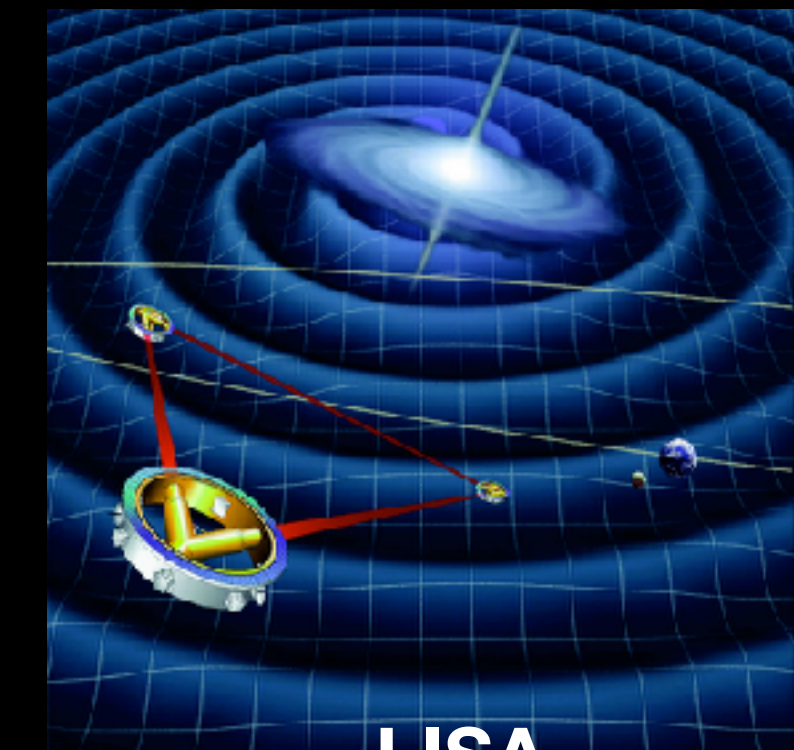
Euclid



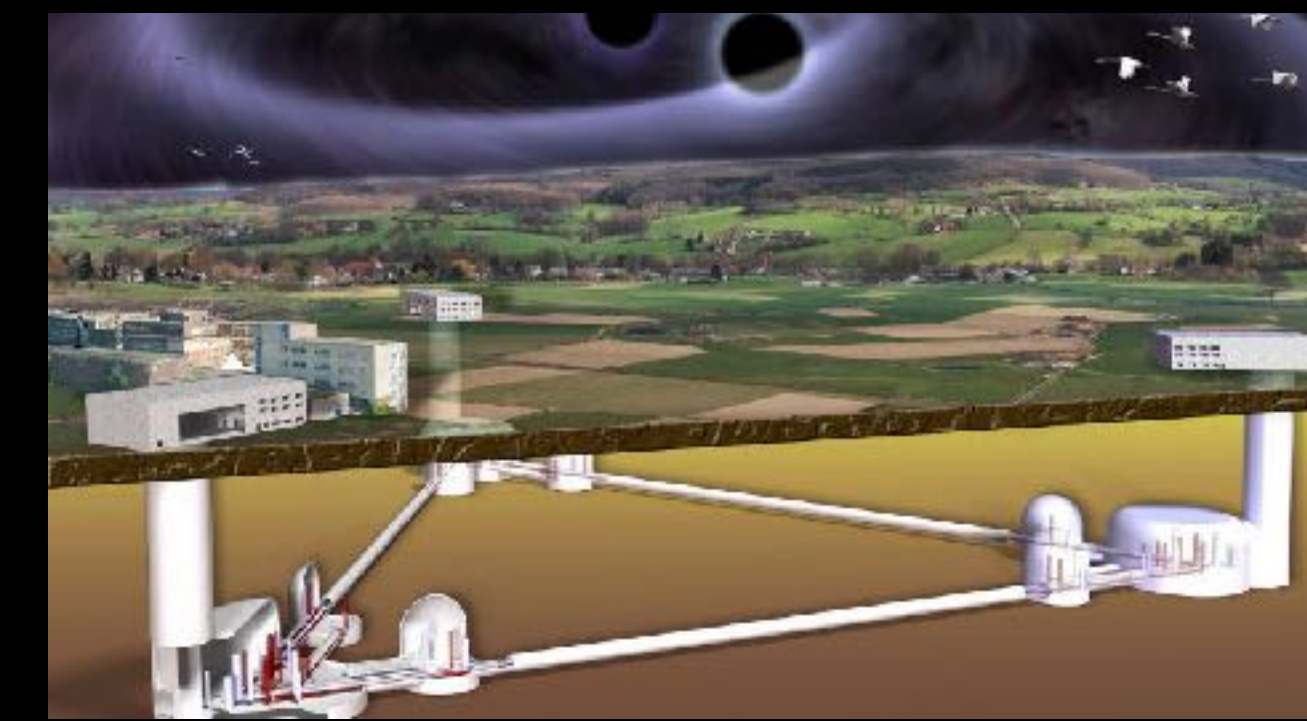
LiteBird



LIGO/Virgo/Kagra



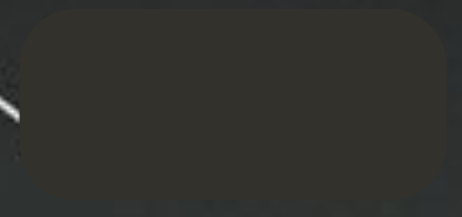
LISA



Einstein Telescope

Au menu...

1. Voyage éclair dans l'Univers
2. La théorie du Big-Bang
3. Les mystères de l'Univers
 - La matière noire
 - L'énergie sombre
 - L'inflation cosmique, le Big-Banget les futurs instruments pour les percer



Smiling Face



10 Centimeters

Smiling Face



10 Centimeters

Les interactions fondamentales

1. Electromagnétisme
 2. Interaction nucléaire faible
 3. Interaction nucléaire forte
- Théorie quantique des champs*

4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein

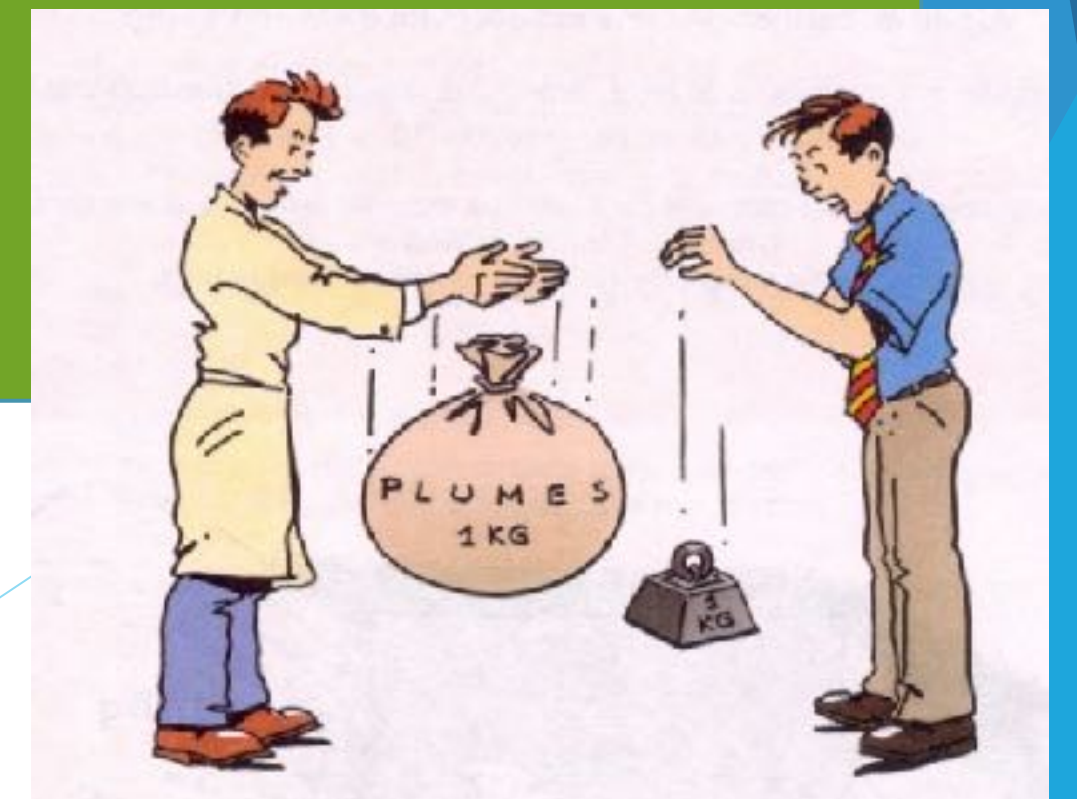
Les interactions fondamentales

1. Electromagnétisme
2. Interaction nucléaire faible
3. Interaction nucléaire forte

Théorie quantique des champs

4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein



Les interactions fondamentales

1. Electromagnétisme

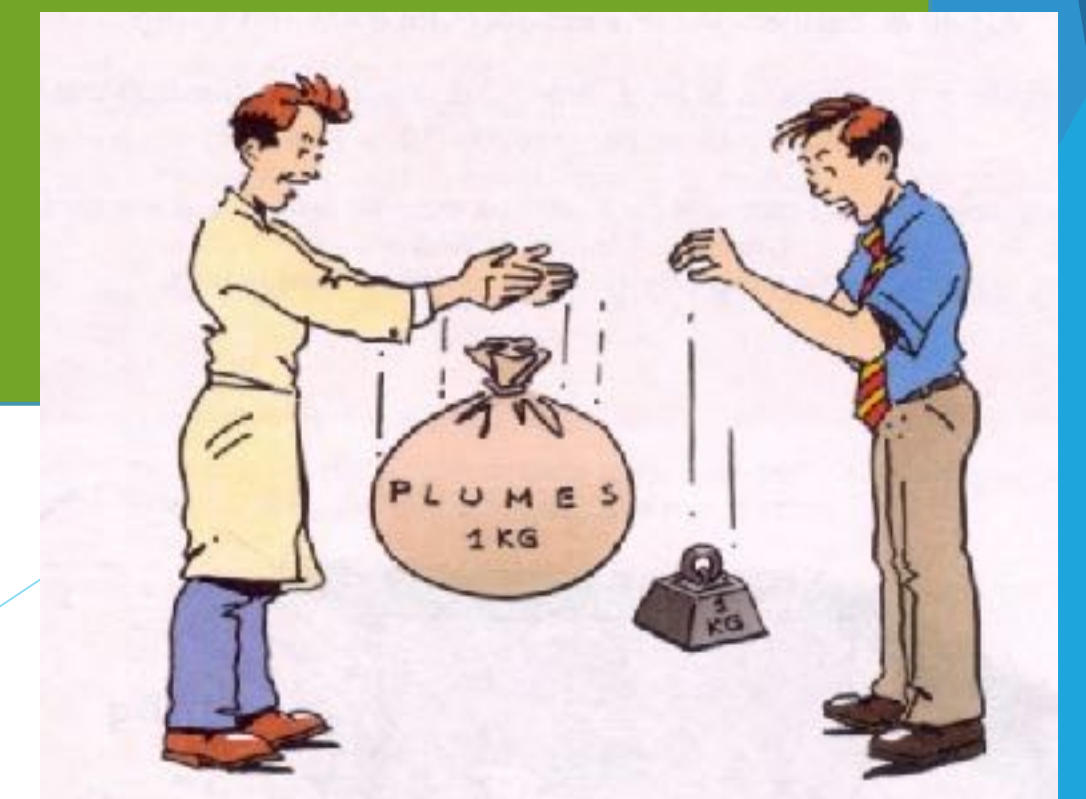
Interaction nucléaire faible

Interaction nucléaire forte

Théorie quantique des champs

4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein



Les interactions fondamentales

Tout le reste !

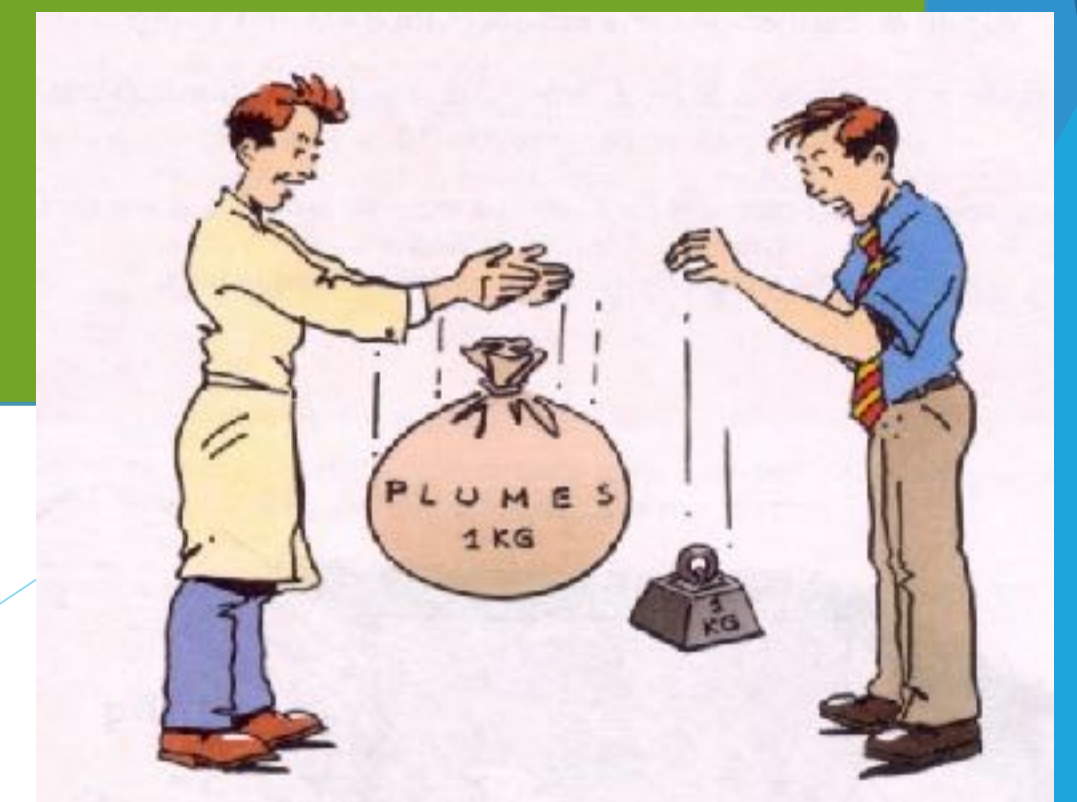
1. Electromagnétisme
- Interaction nucléaire faible
- Interaction nucléaire forte

Théorie quantique des champs



4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein



Les interactions fondamentales

Tout le reste !

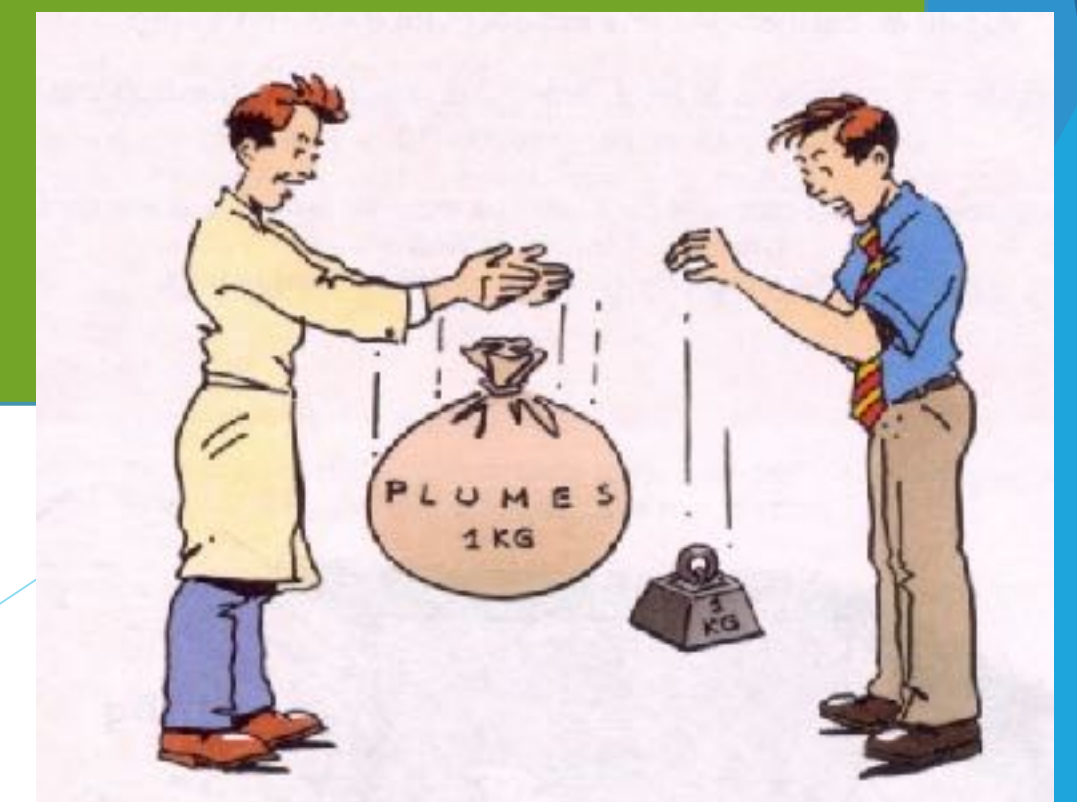
1. Electromagnétisme
- Interaction nucléaire faible
- Interaction nucléaire forte



Théorie quantique des champs

4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein

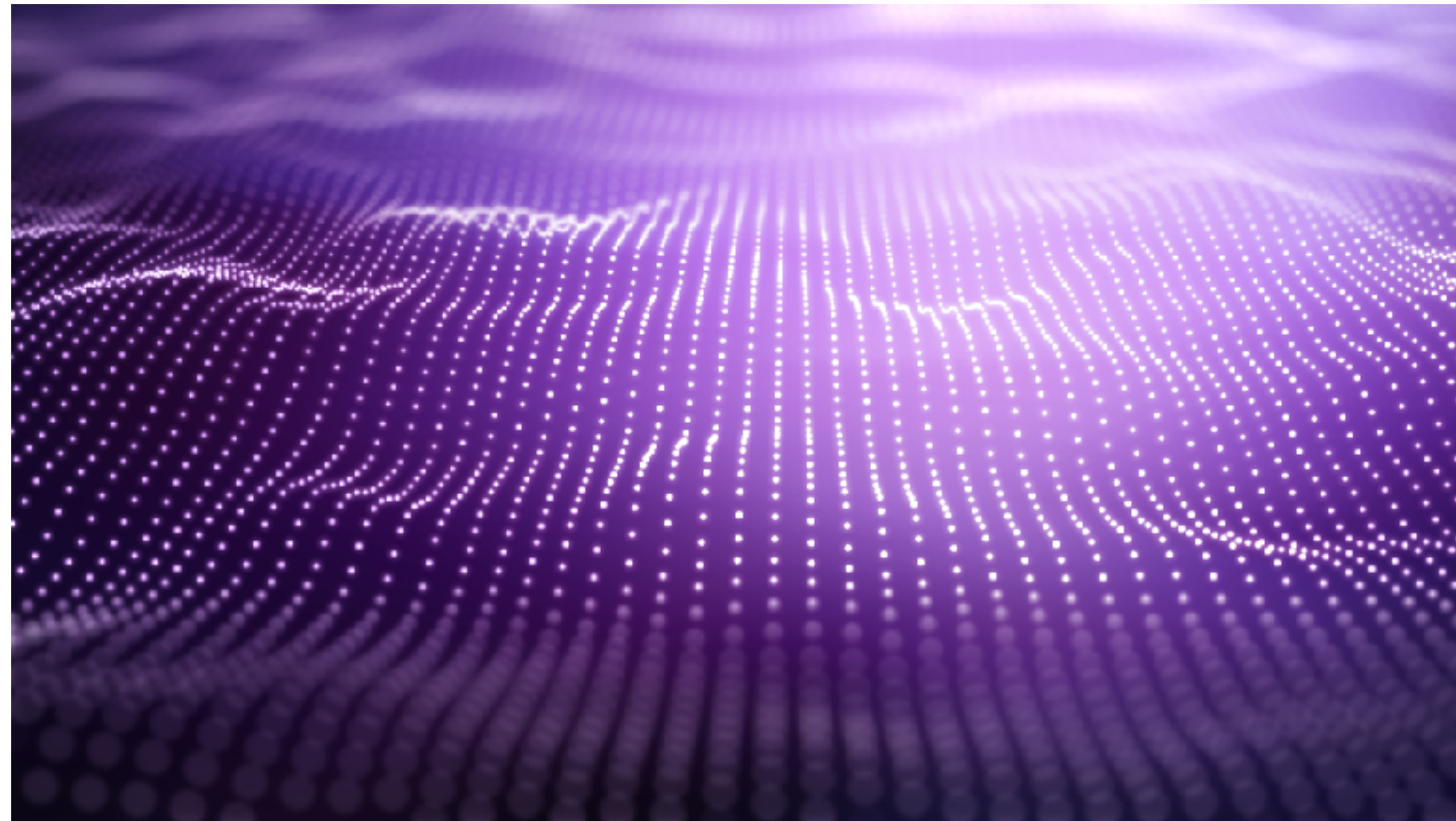


Stockholm + 1 M€



Les interactions fondamentales

Image by kjpargeter on Freepik



- **Champs:** existent partout dans l'espace-temps
- **Particule** (electron, photon...): excitation quantifiée du champ ~ vague, onde qui se déplace
- **Interaction:** une vague d'un champ produit une vague d'un autre champ

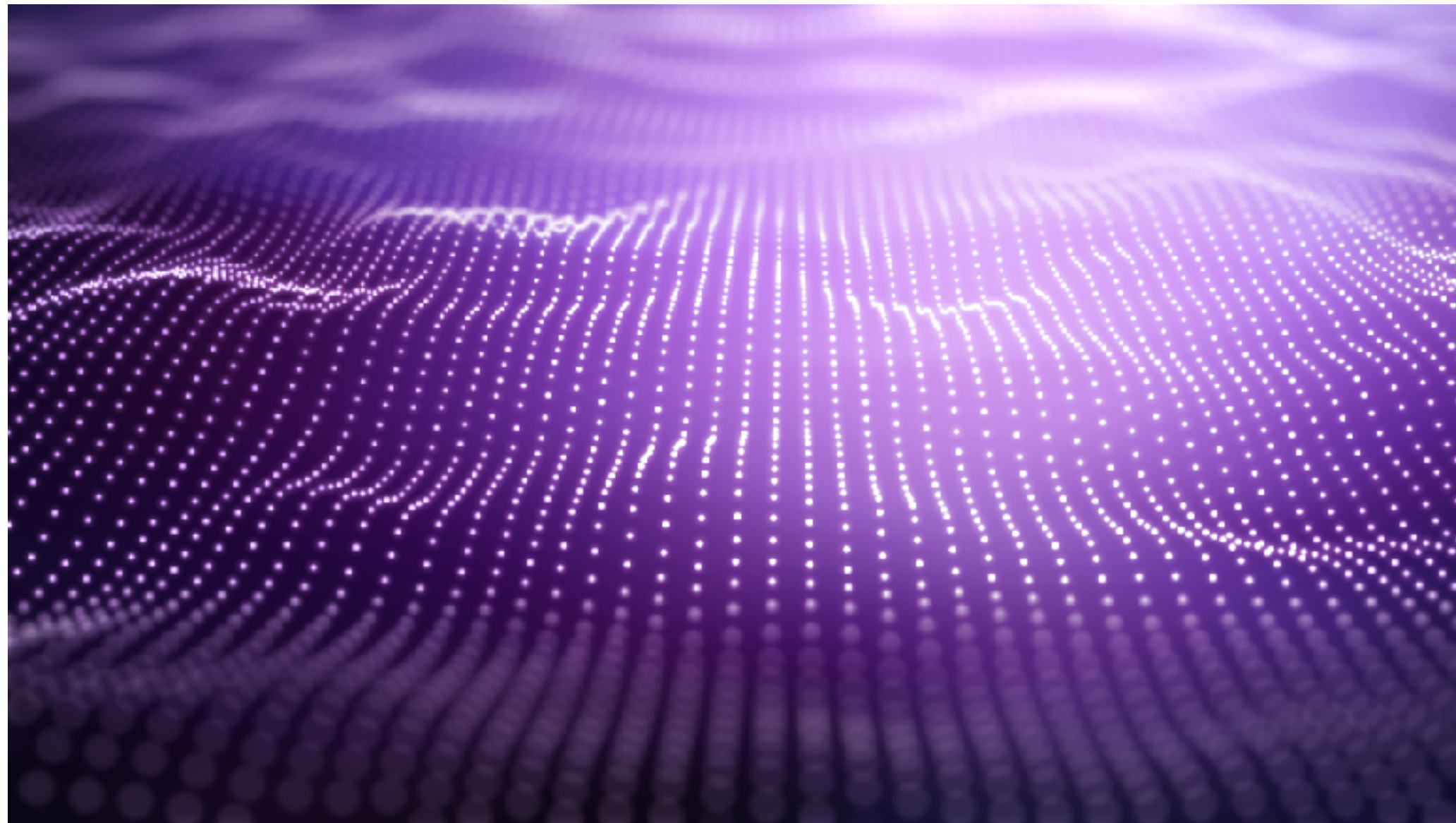
4. Gravitation

Relativité Générale d'Einstein

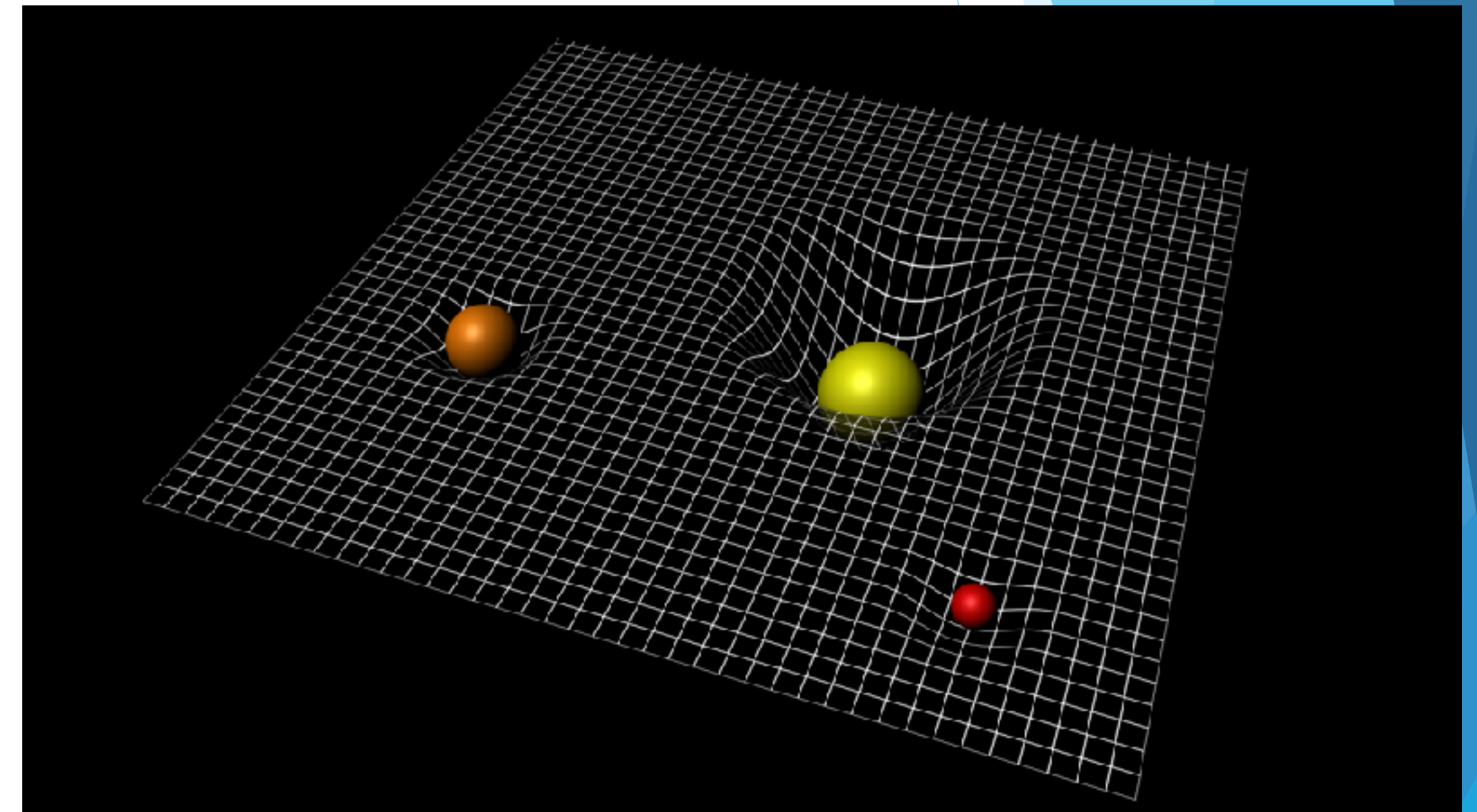
Image by kjpargeter on Freepik

Les interactions fondamentales

Image by kjpargeter on Freepik



Crédit: ESA



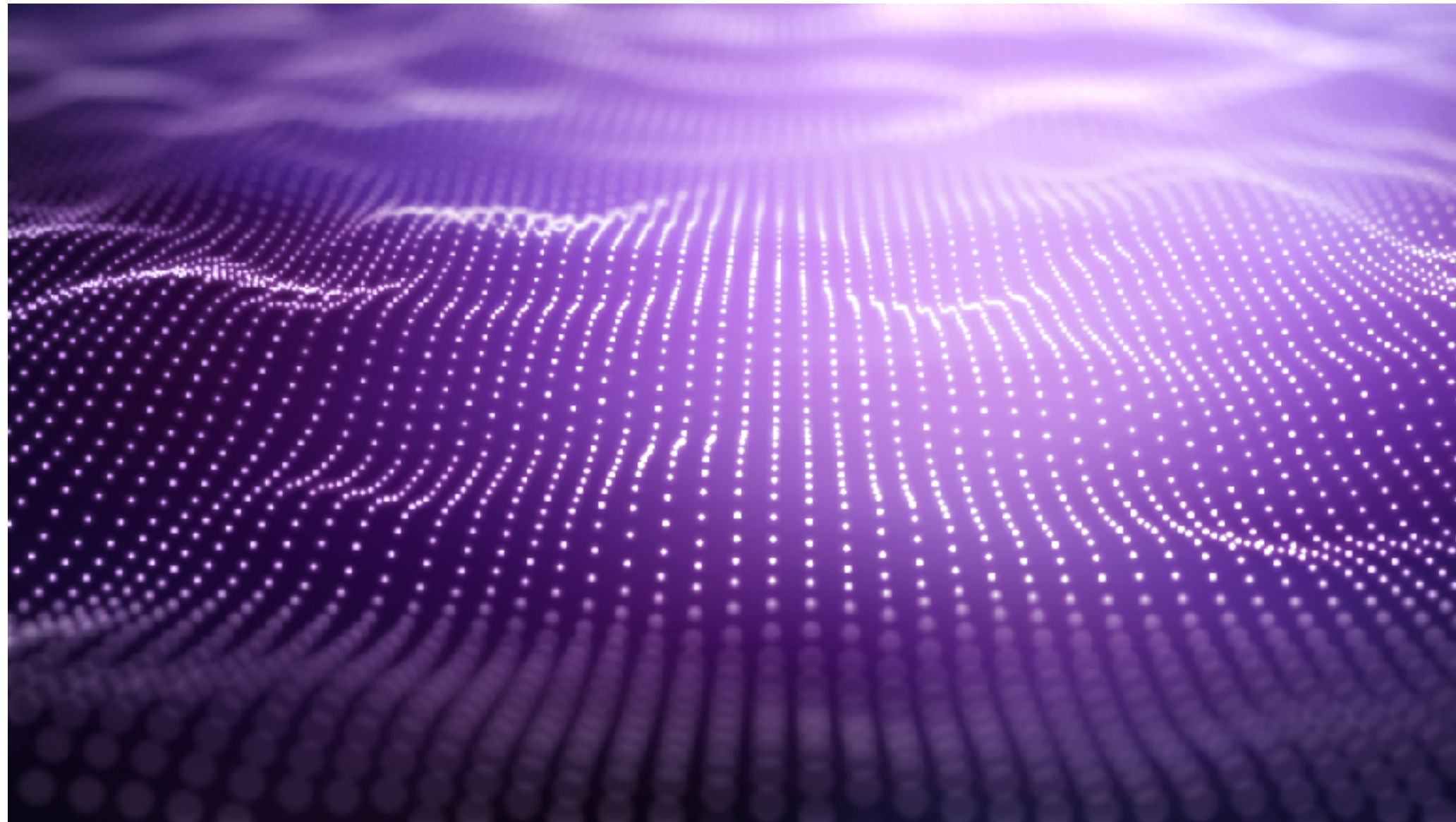
- **Champs:** existent partout dans l'espace-temps
- **Particule** (electron, photon...): excitation quantifiée du champ ~ vague, onde qui se déplace
- **Interaction:** une vague d'un champ produit une vague d'un autre champ

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

Image by kjpargeter on Freepik

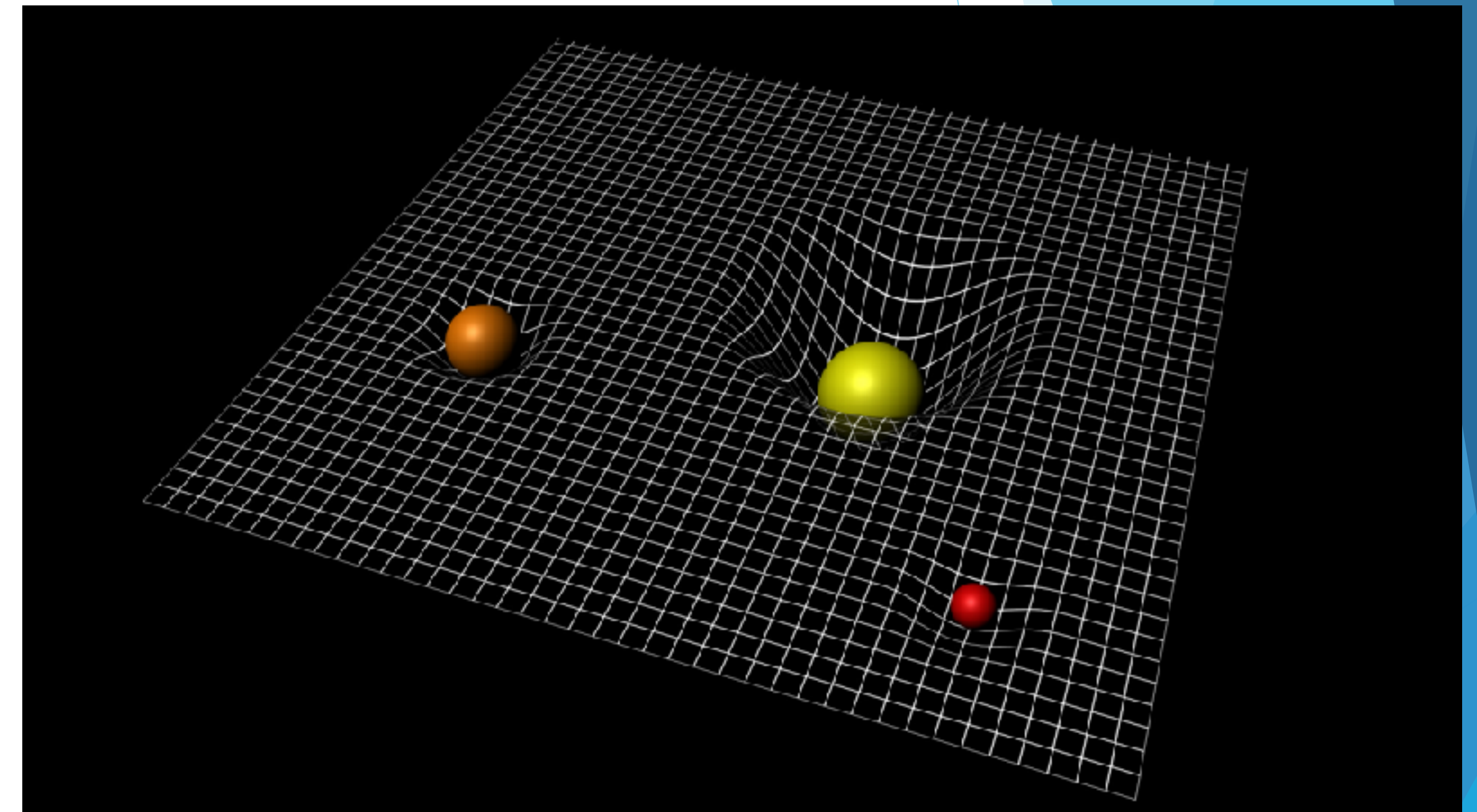
Les interactions fondamentales

Image by kjpargeter on Freepik



- **Champs:** existent partout dans l'espace-temps
- **Particule** (electron, photon...): excitation quantifiée du champ ~ vague, onde qui se déplace
- **Interaction:** une vague d'un champ produit une vague d'un autre champ

Crédit: ESA



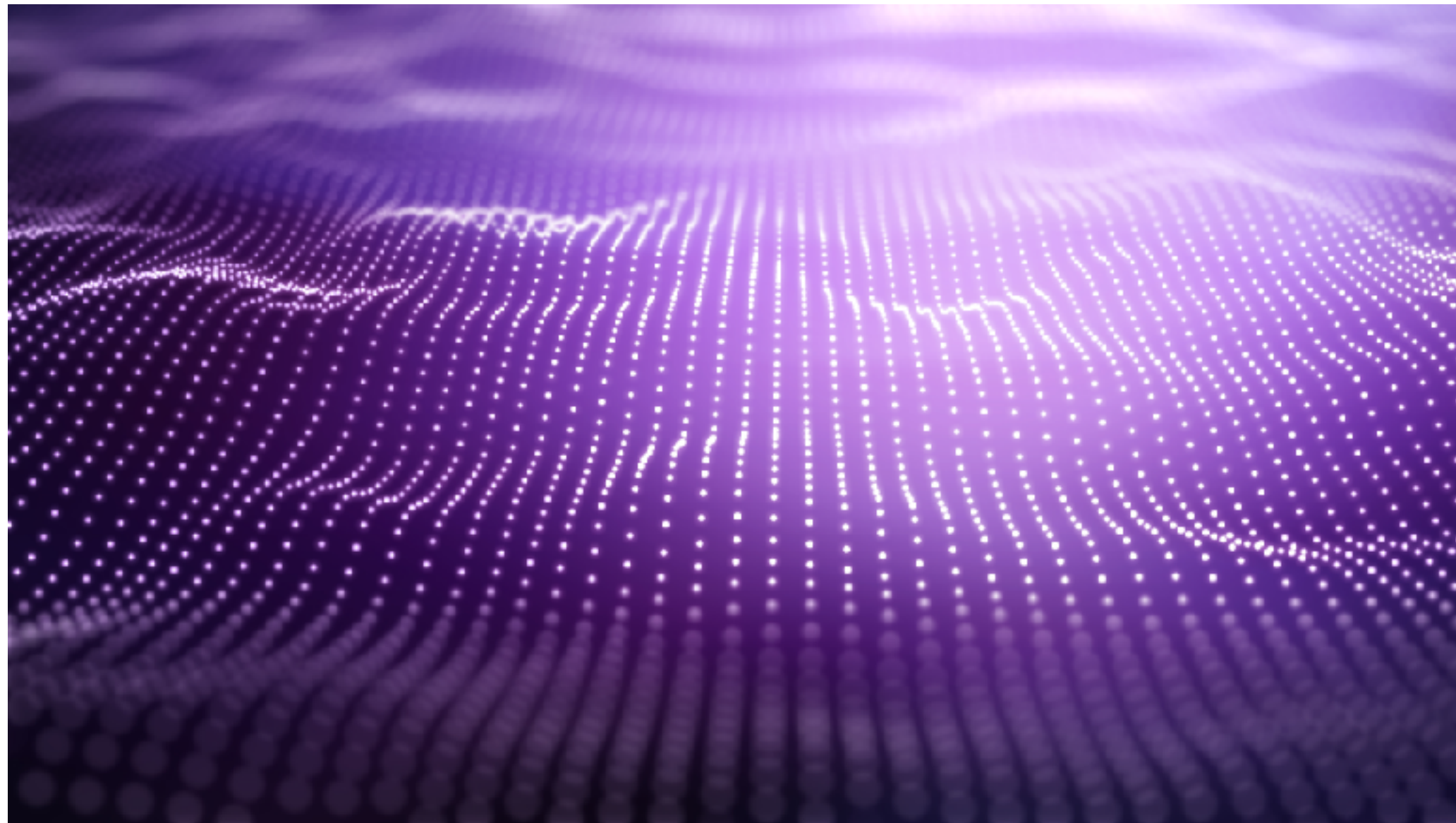
Forme et dynamique
(géométrie) de
l'espace-temps

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

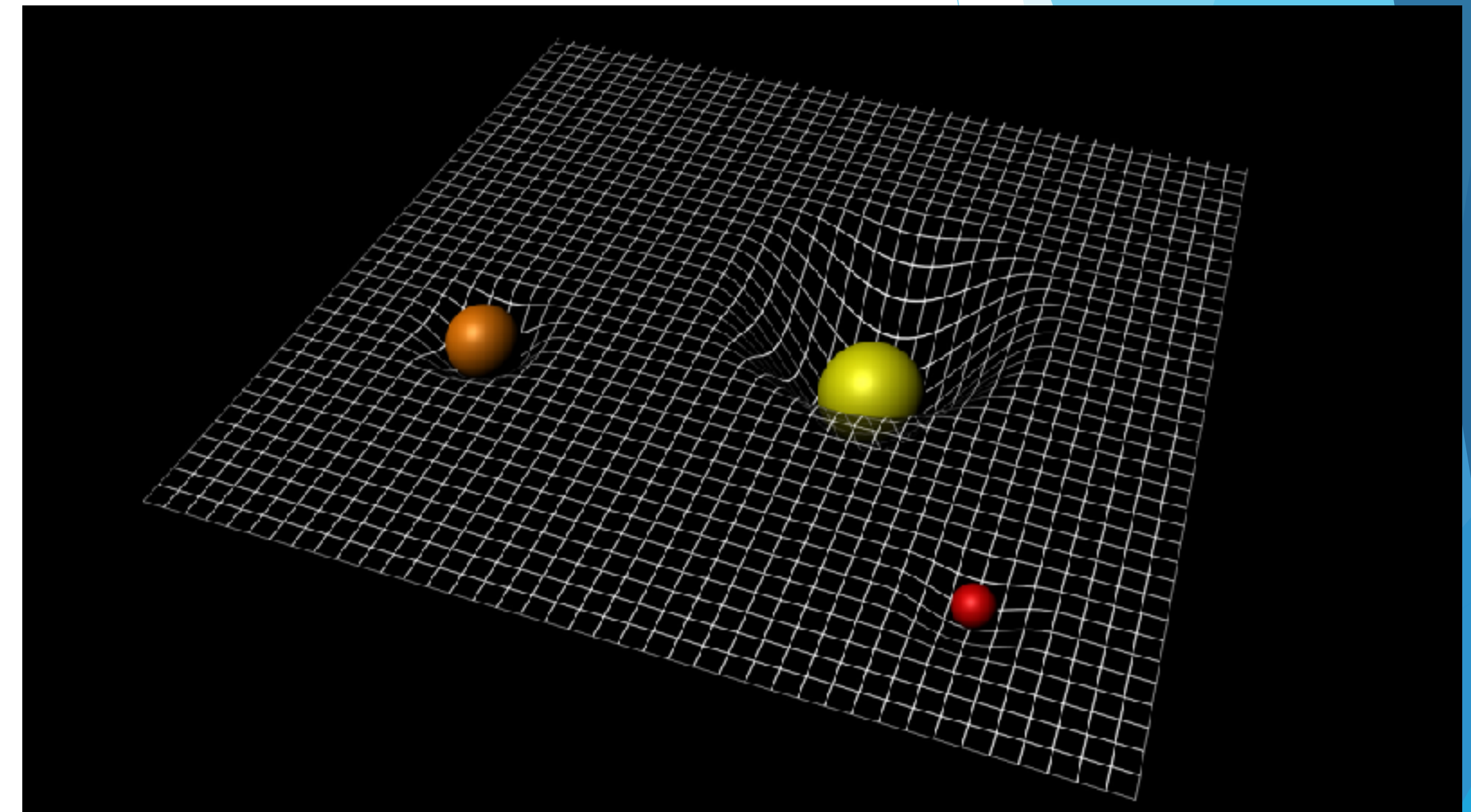
Image by kjpargeter on Freepik

Les interactions fondamentales

Image by kjpargeter on Freepik



Crédit: ESA



- **Champs:** existent partout dans l'espace-temps
- **Particule** (electron, photon...): excitation quantifiée du champ ~ vague, onde qui se déplace
- **Interaction:** une vague d'un champ produit une vague d'un autre champ

Forme et dynamique
(géométrie) de
l'espace-temps

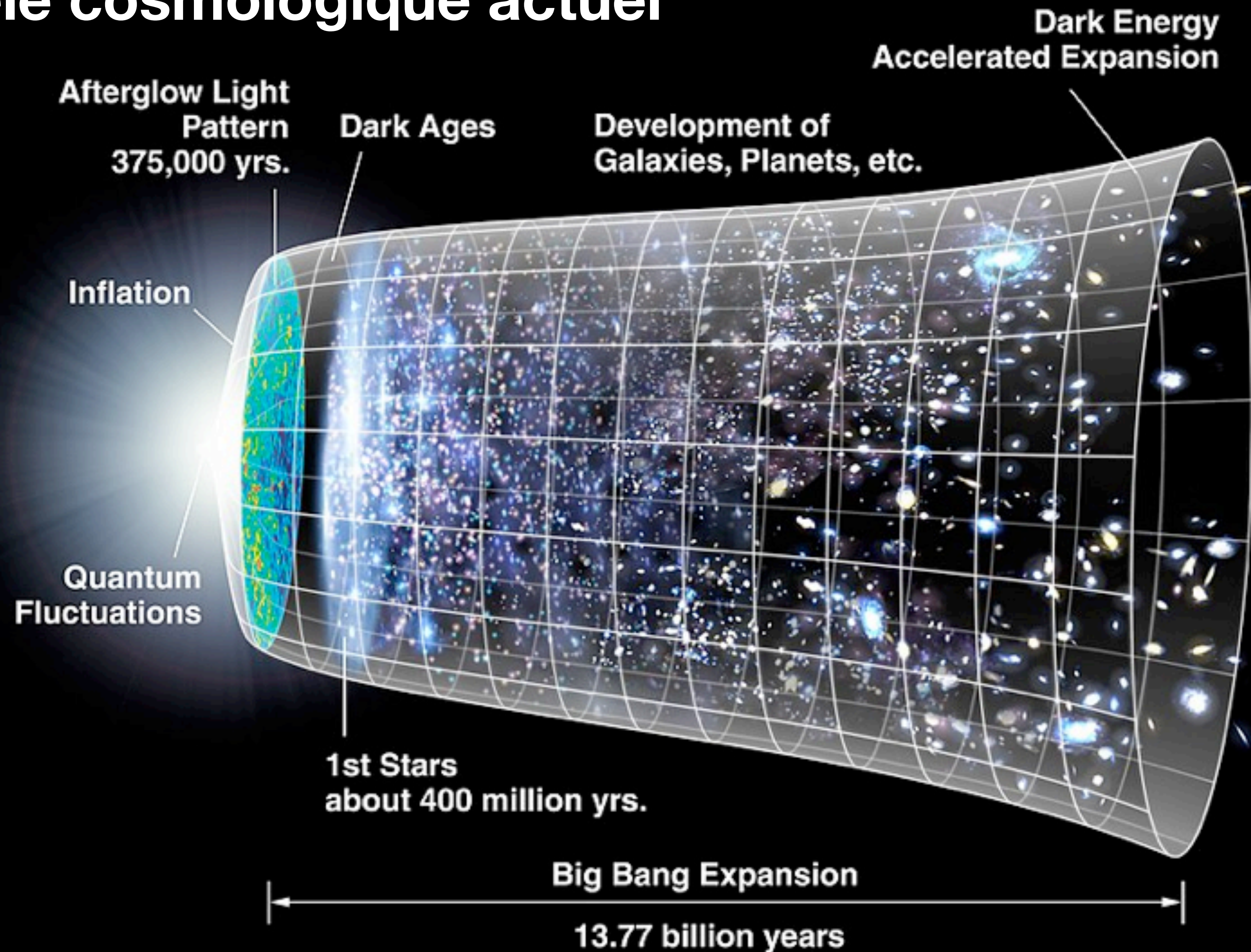
=

Contenu de
l'espace-
temps

Image by kjpargeter on Freepik

La théorie du Big-Bang

Notre modèle cosmologique actuel



La théorie du Big-Bang

Qu'est-ce que la cosmologie

La théorie du Big-Bang

Qu'est-ce que la cosmologie

- Ce que ce n'est pas:
 - Etude des parfums (cosmétologie)



La théorie du Big-Bang

Qu'est-ce que la cosmologie

- Ce que ce n'est pas:
 - Etude des parfums (cosmétologie)
 - Les horoscopes (astrologie)



La théorie du Big-Bang

Qu'est-ce que la cosmologie

- Ce que ce n'est pas:
 - Etude des parfums (cosmétologie)
 - Les horoscopes (astrologie)

Plus subtil:

- Astronomie / Astrophysique

- Ce que c'est:

Branche de l'astronomie qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers considéré dans son ensemble

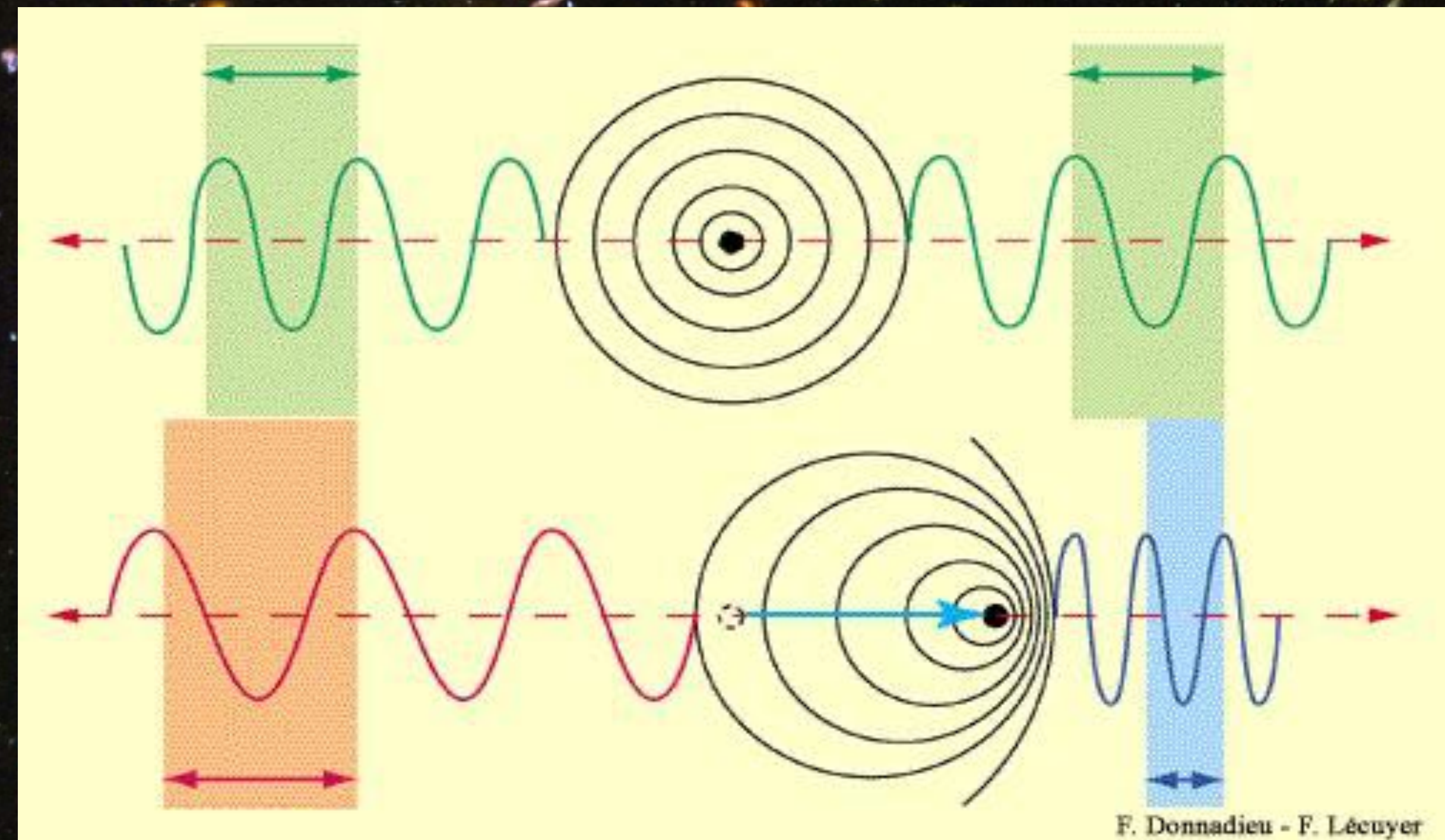
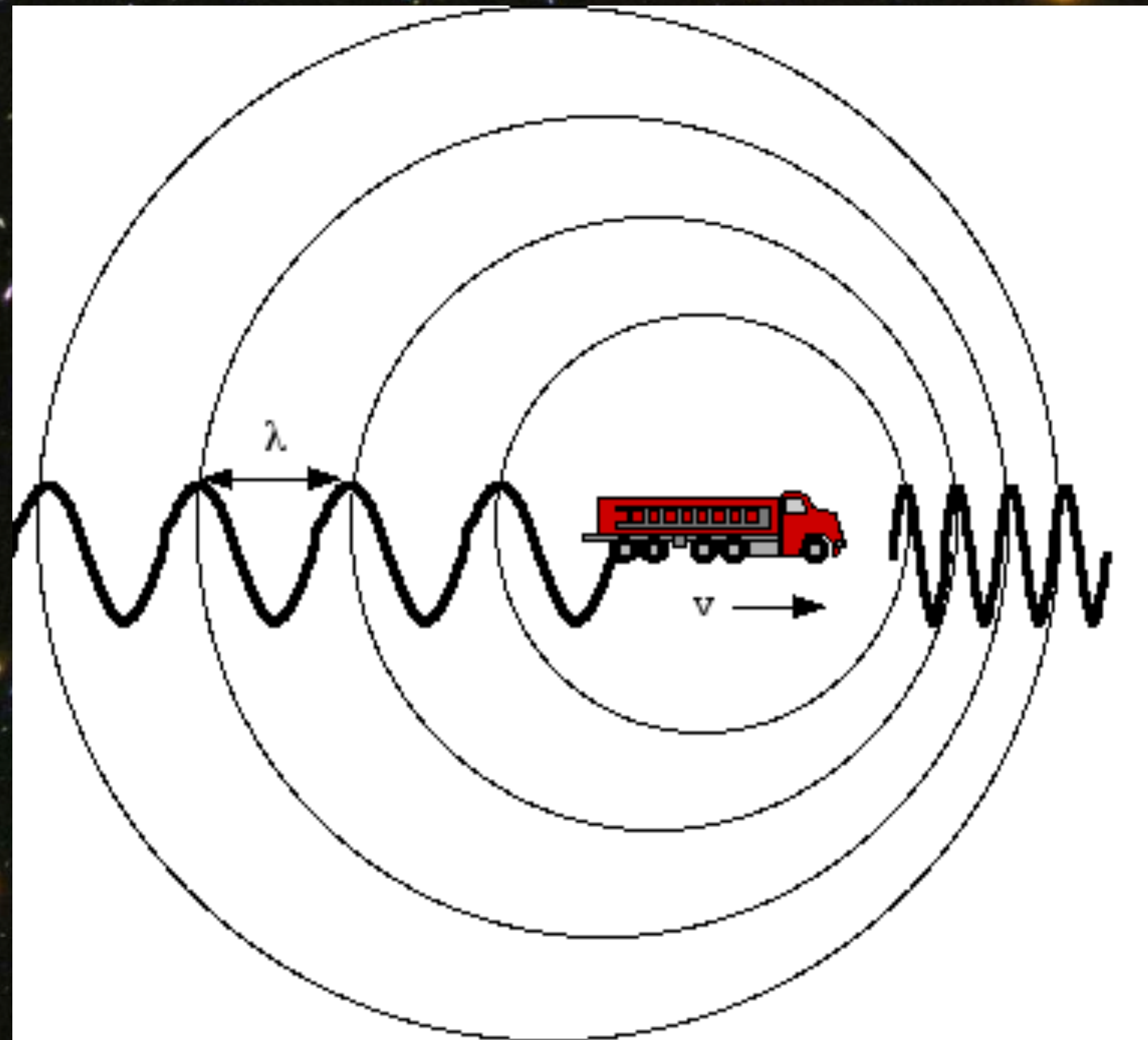
Le Petit Larousse.



La théorie du Big-Bang

Preuve 1: Mesure de l'éloignement des galaxies (Hubble 1929, Lemaître 1927)

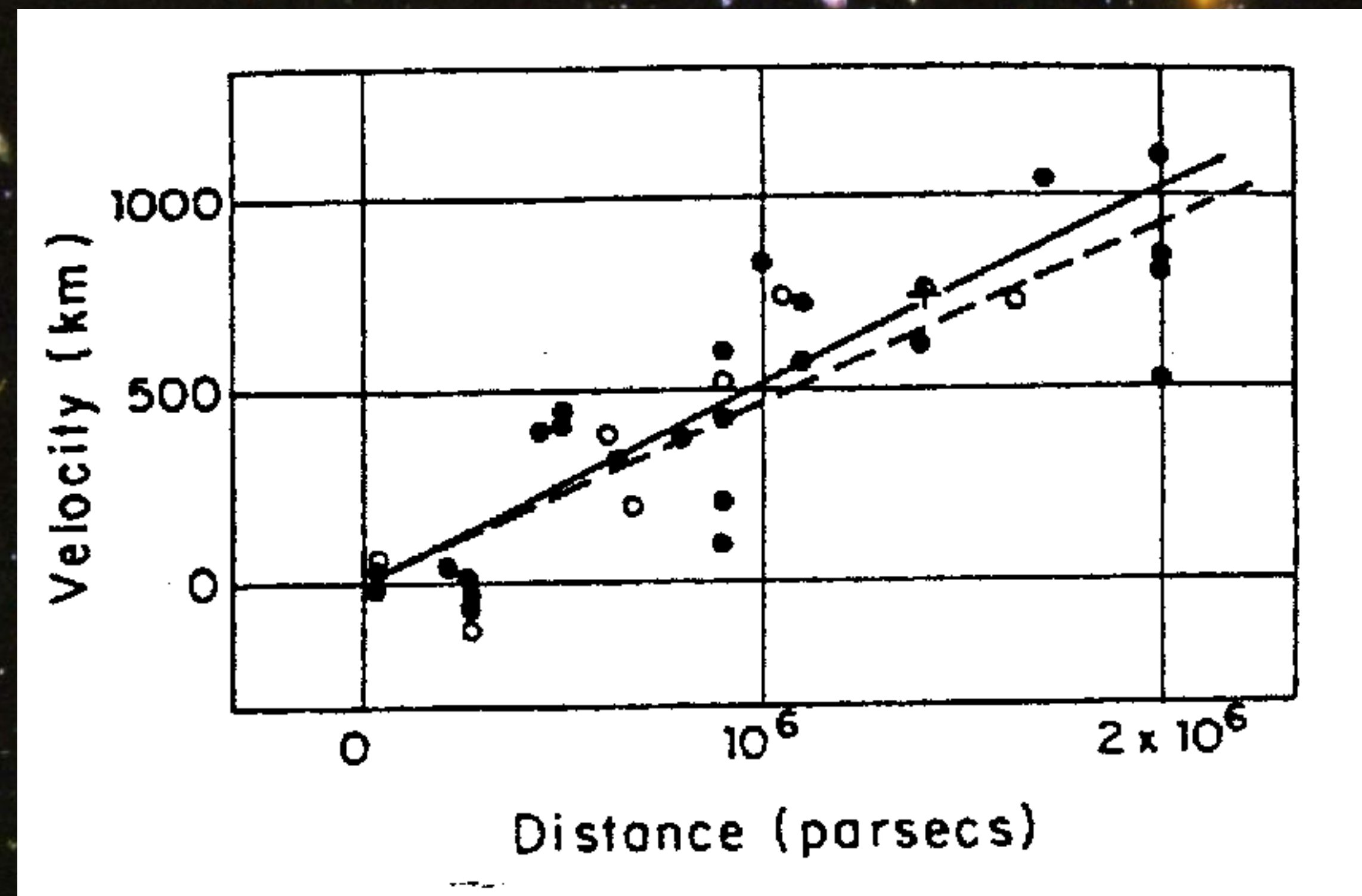
- Décalage vers le rouge (effet Doppler-Fizeau)



La théorie du Big-Bang

Preuve 1: Mesure de l'éloignement des galaxies (Hubble 1929, Lemaître 1927)

- Décalage vers le rouge (effet Doppler-Fizeau)



1 parsec = 30 000 000 000 000 km

Preuve de l'expansion de l'univers!

La théorie du Big-Bang

Preuve 2: Abondance des éléments légers



Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

La théorie du Big-Bang

Preuve 2: Abondance des éléments légers

1 H																	2 He														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																								

L'Alchimiste de l'Univers

2017: GW170817: fusion d'étoiles à neutrons observée par trois détecteurs d'ondes gravitationnelles et plusieurs télescopes

- origine des éléments lourds dans l'Univers
- 10 masses terrestres d'or en ~1 seconde

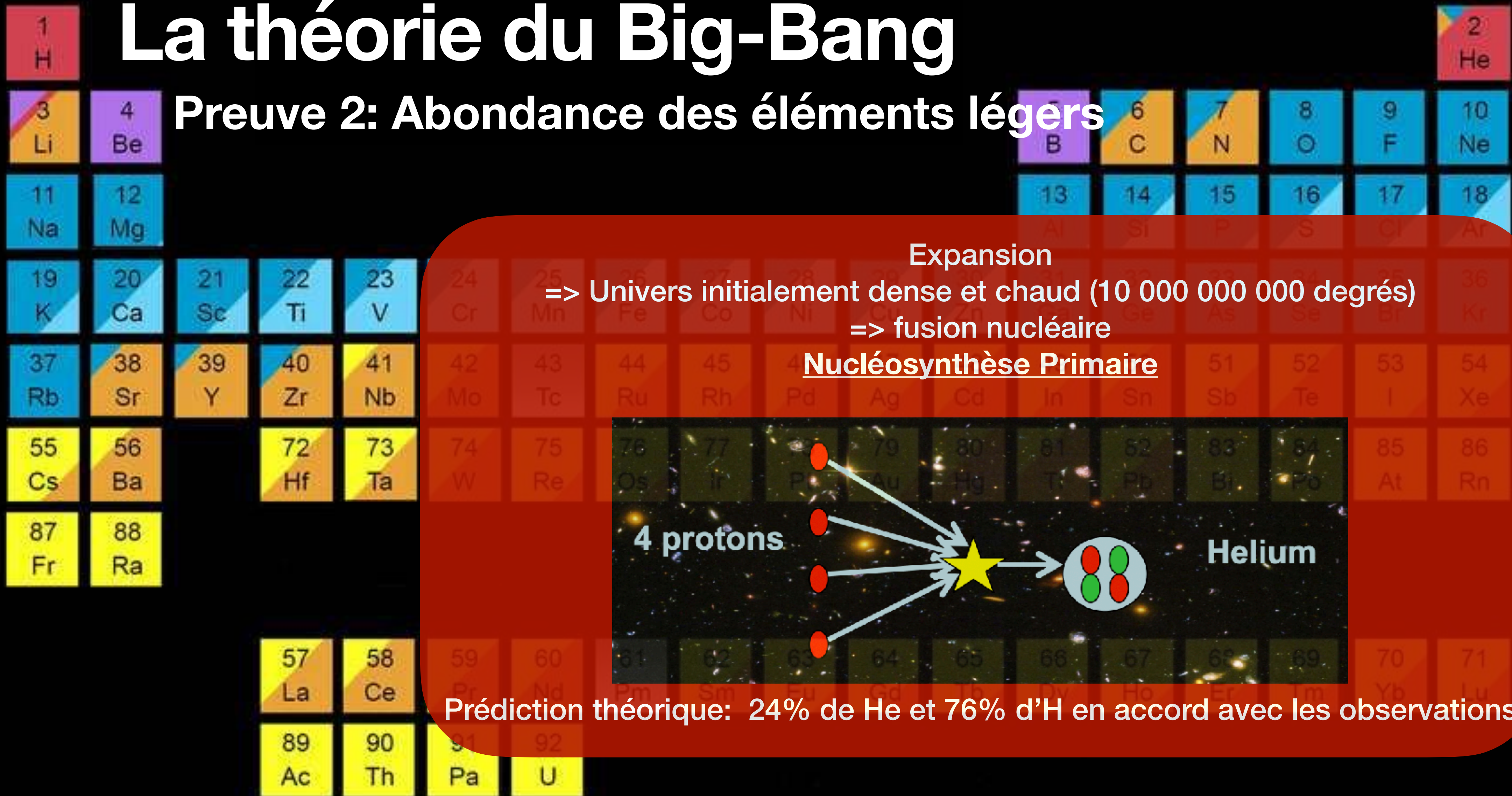
Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

La théorie du Big-Bang

Preuve 2: Abondance des éléments légers



Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologie (Penzias et Wilson, 1965)

Pour un physicien:

Univers primordial: - noyaux d'H
- noyaux d'He
- électrons libres
- photons

Ionisation: atome d'Hydrogène: 13,6 eV



Univers opaque devient transparent

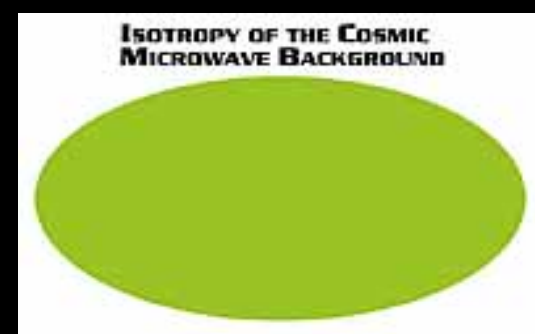
3000 K

2.7 K

Longueur d'onde:
3 microns

Expansion d'un facteur 1100

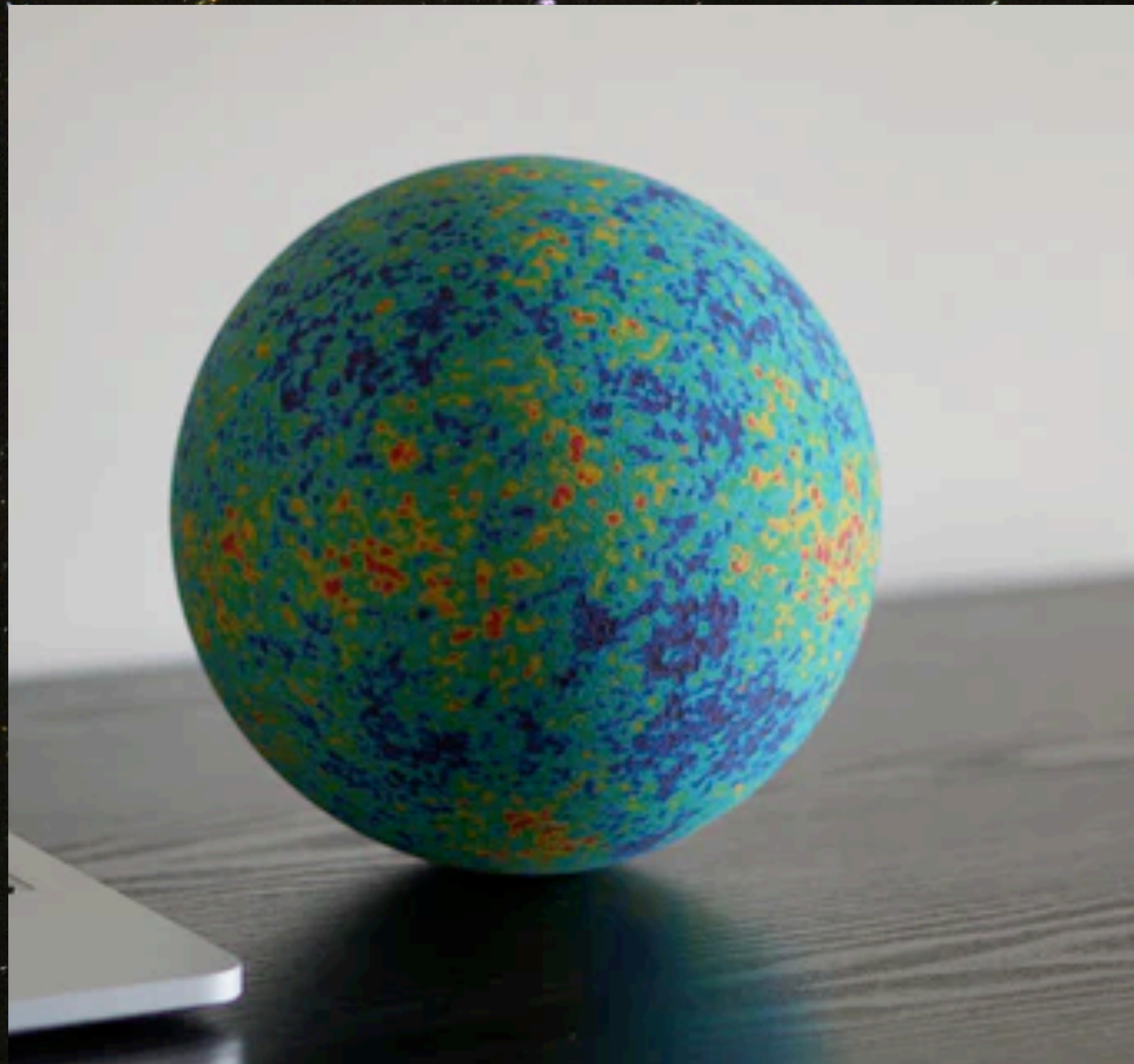
Longueur d'onde:
3 mm, càd 100Ghz



Le CMB est la première « image » de l'univers!

La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologie (Penzias et Wilson, 1965)



Planck

Crédit: *The big-bang theory*, dernière saison

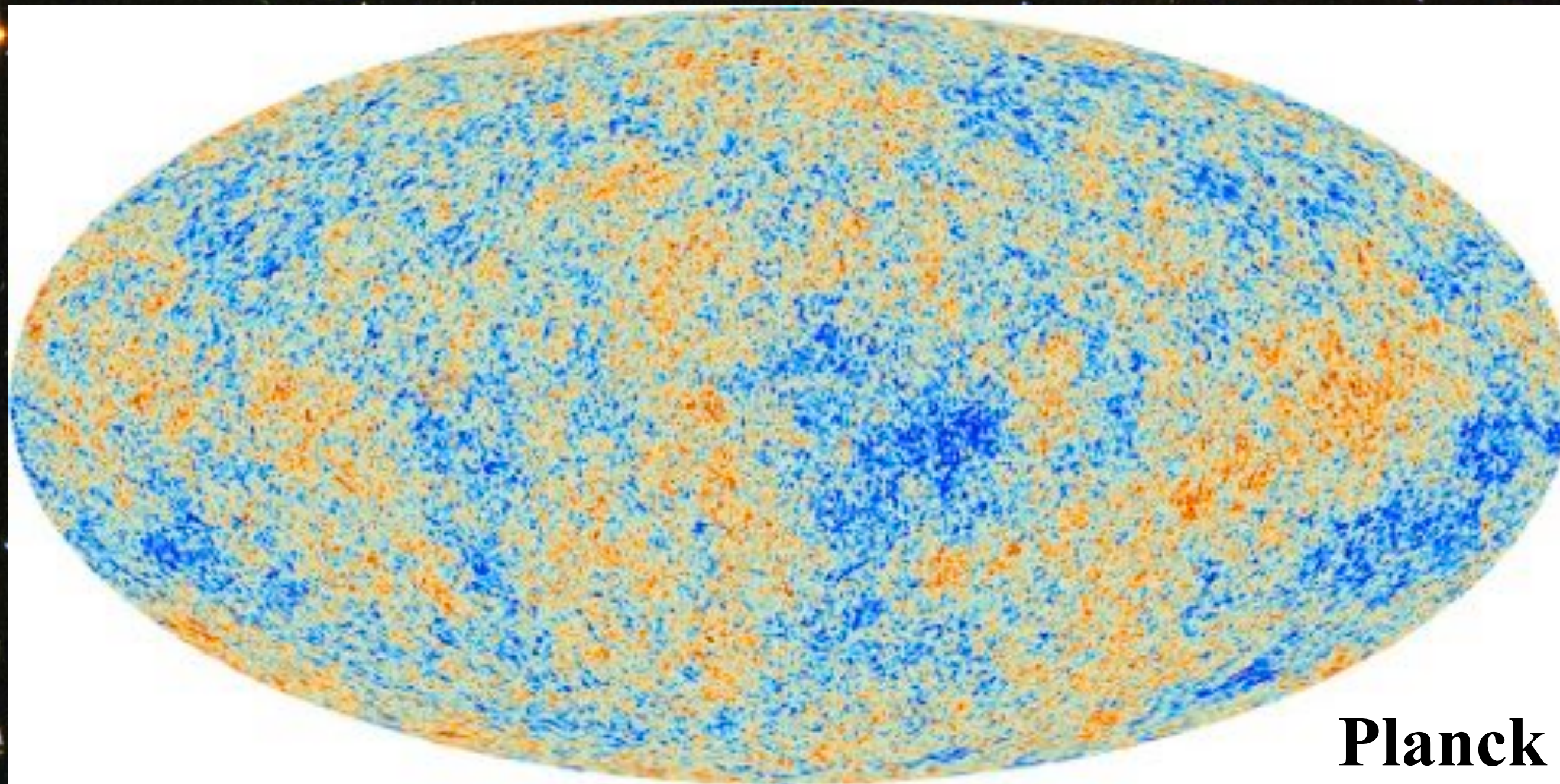


La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologie



Fluctuations de $1/100000$



Origine des structures actuelles

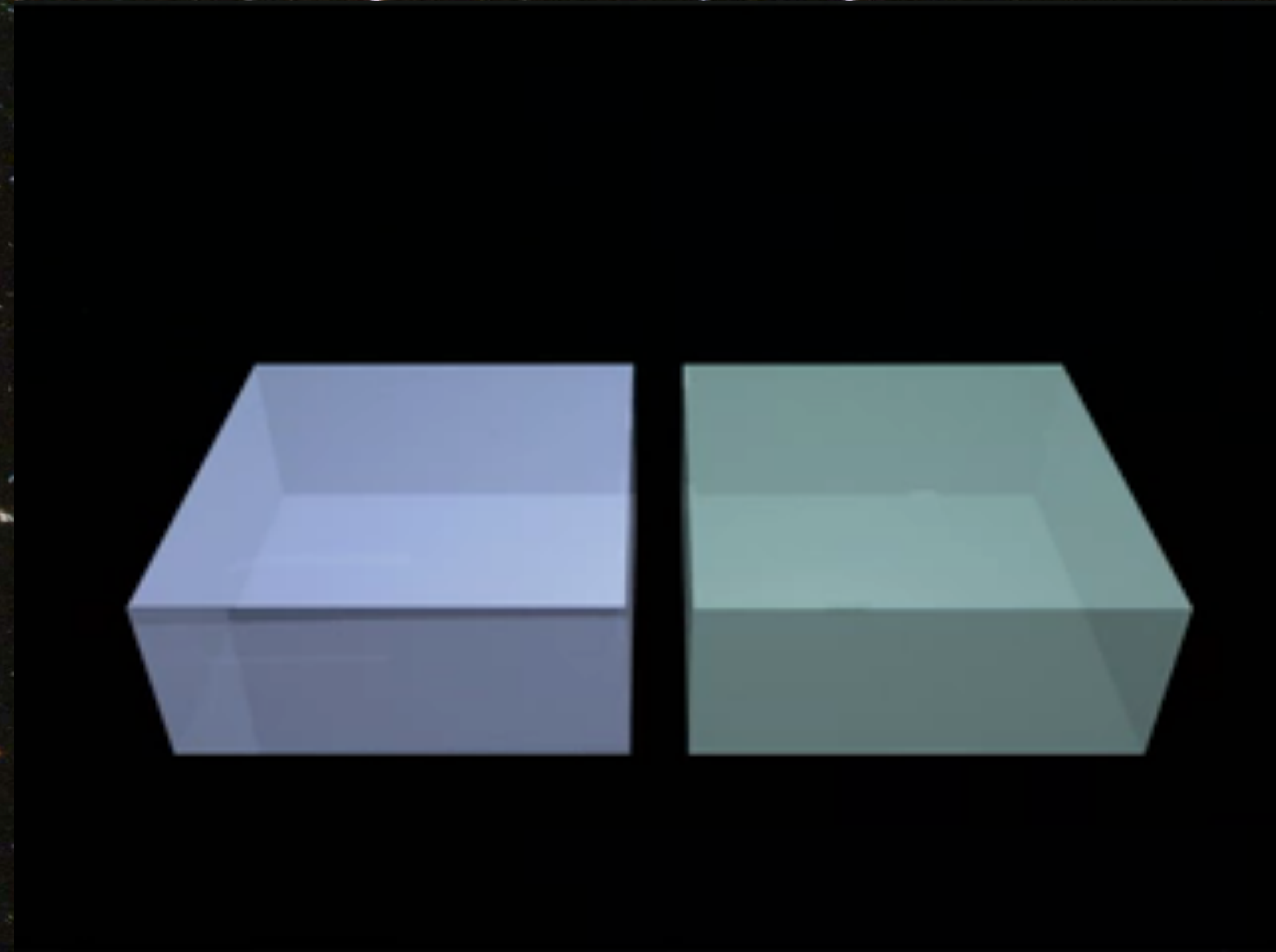
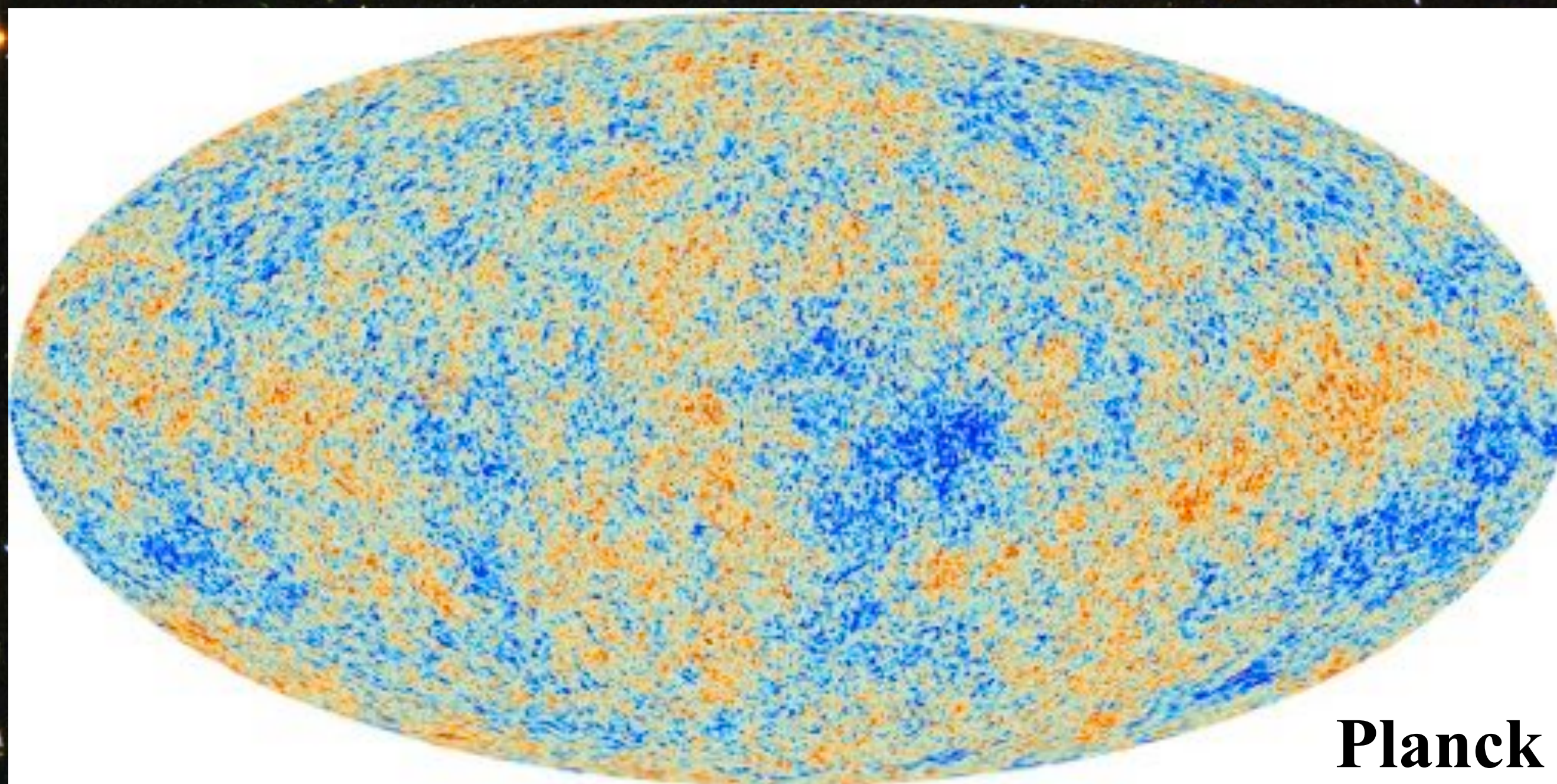


La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologie



Fluctuations de 1/100000

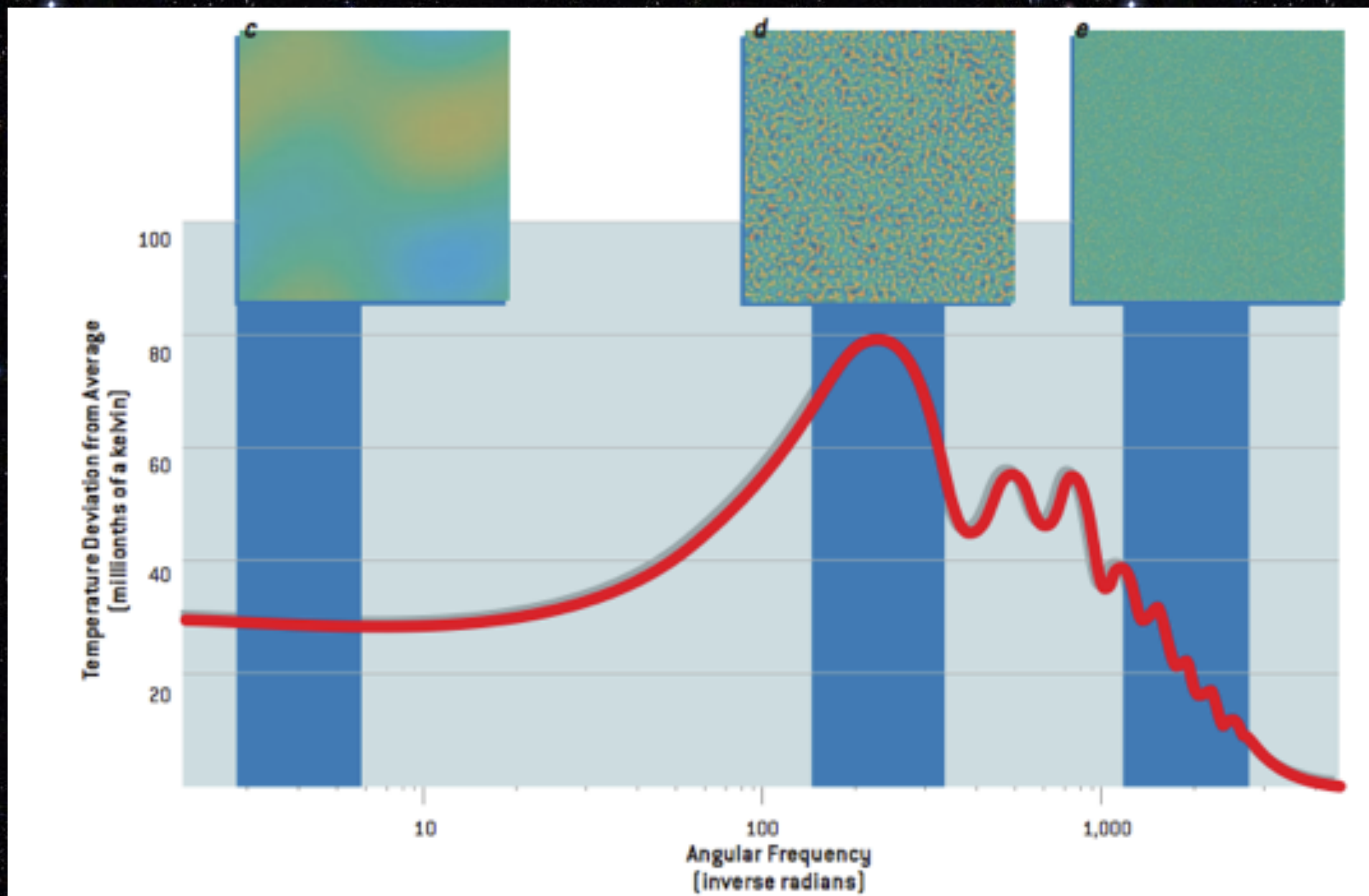


Origine des structures actuelles



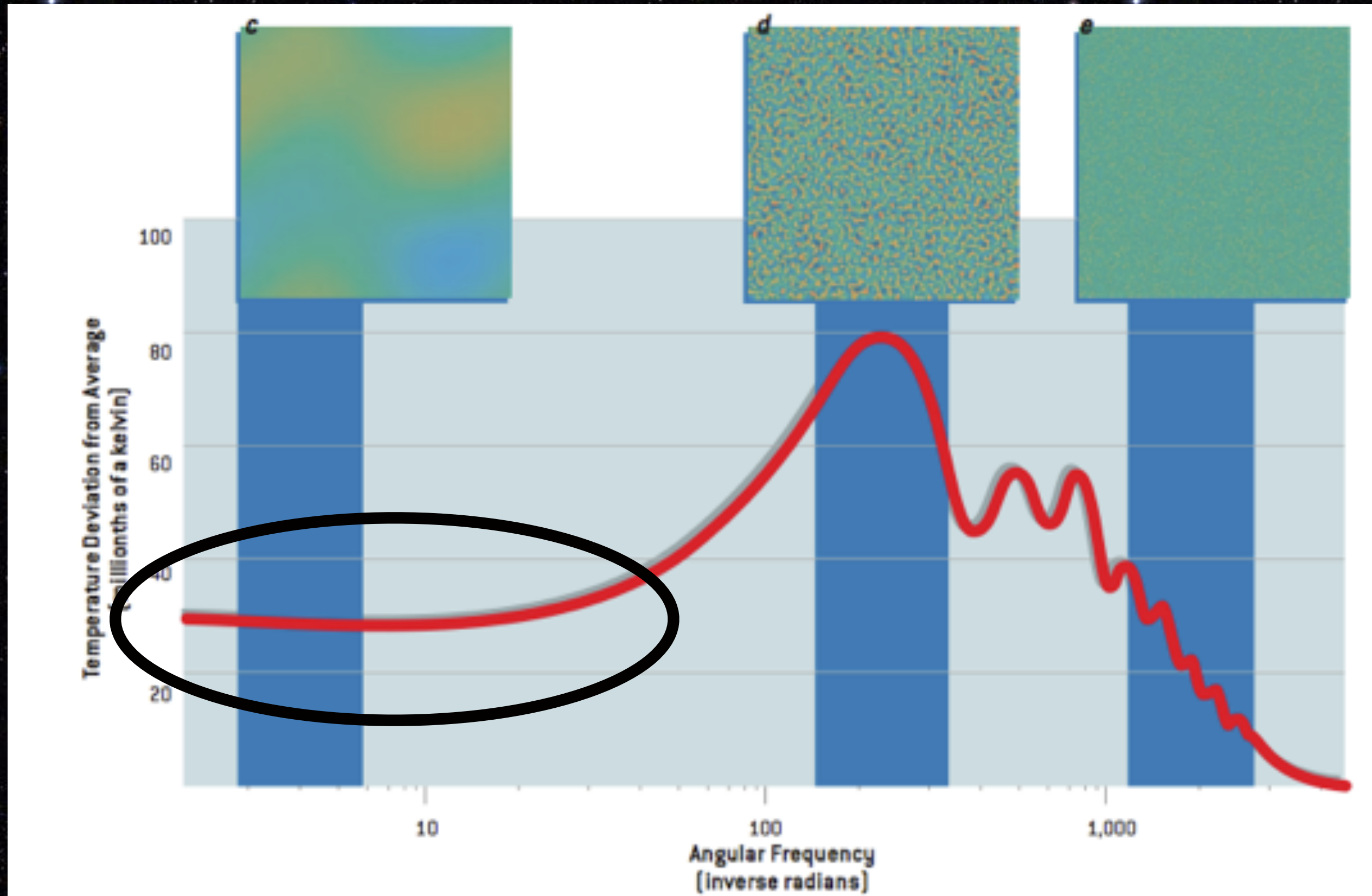
La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologique



La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologique



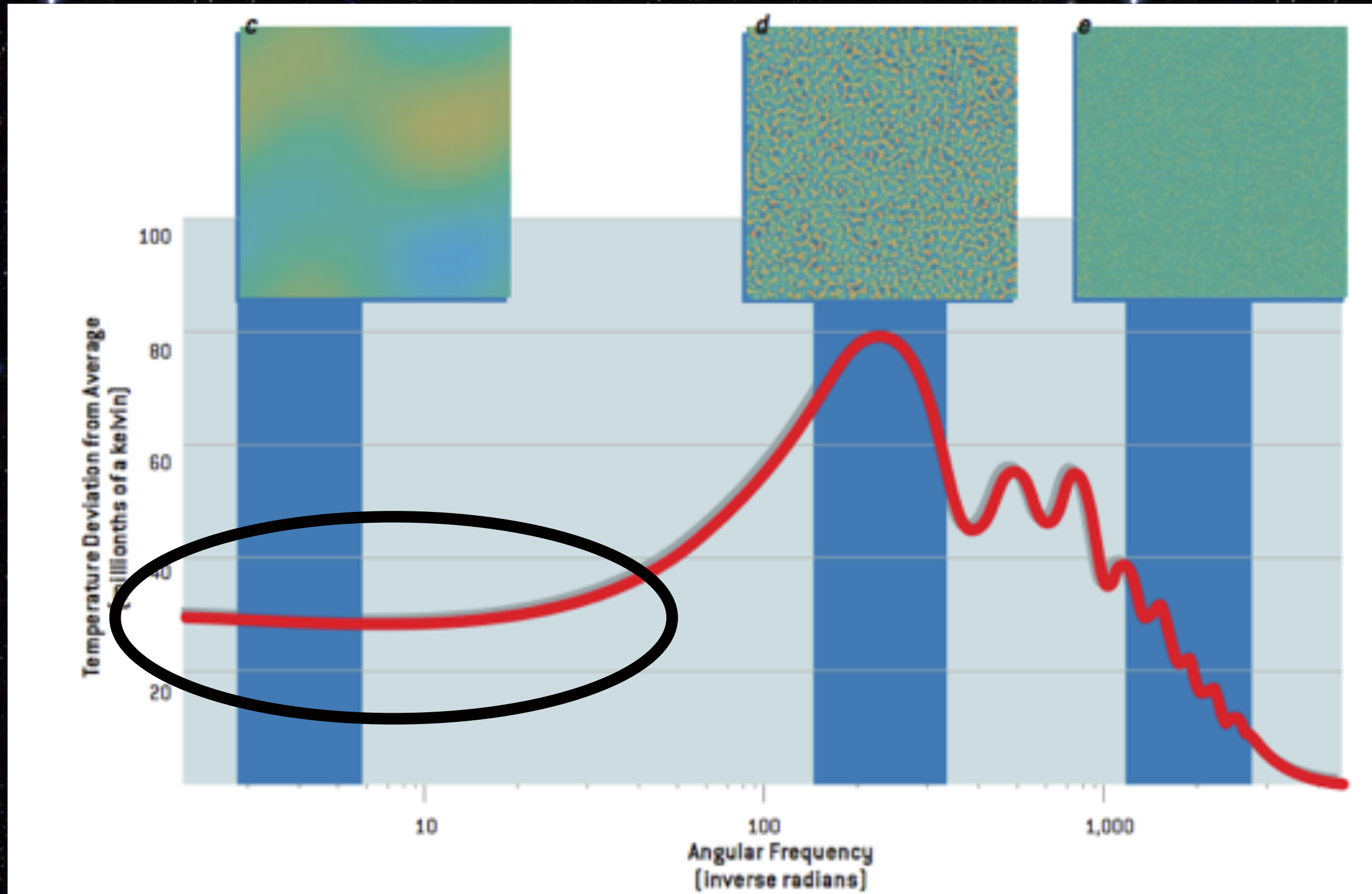
Plateau à grande échelle

Inhomogénéités initiales
de même importance,
quelle que soit leur taille

Intensité et position des
pics: ingrédients
présents dans l'Univers

La théorie du Big-Bang

Preuve 3: Le fond diffus cosmologique



Plateau à grande échelle

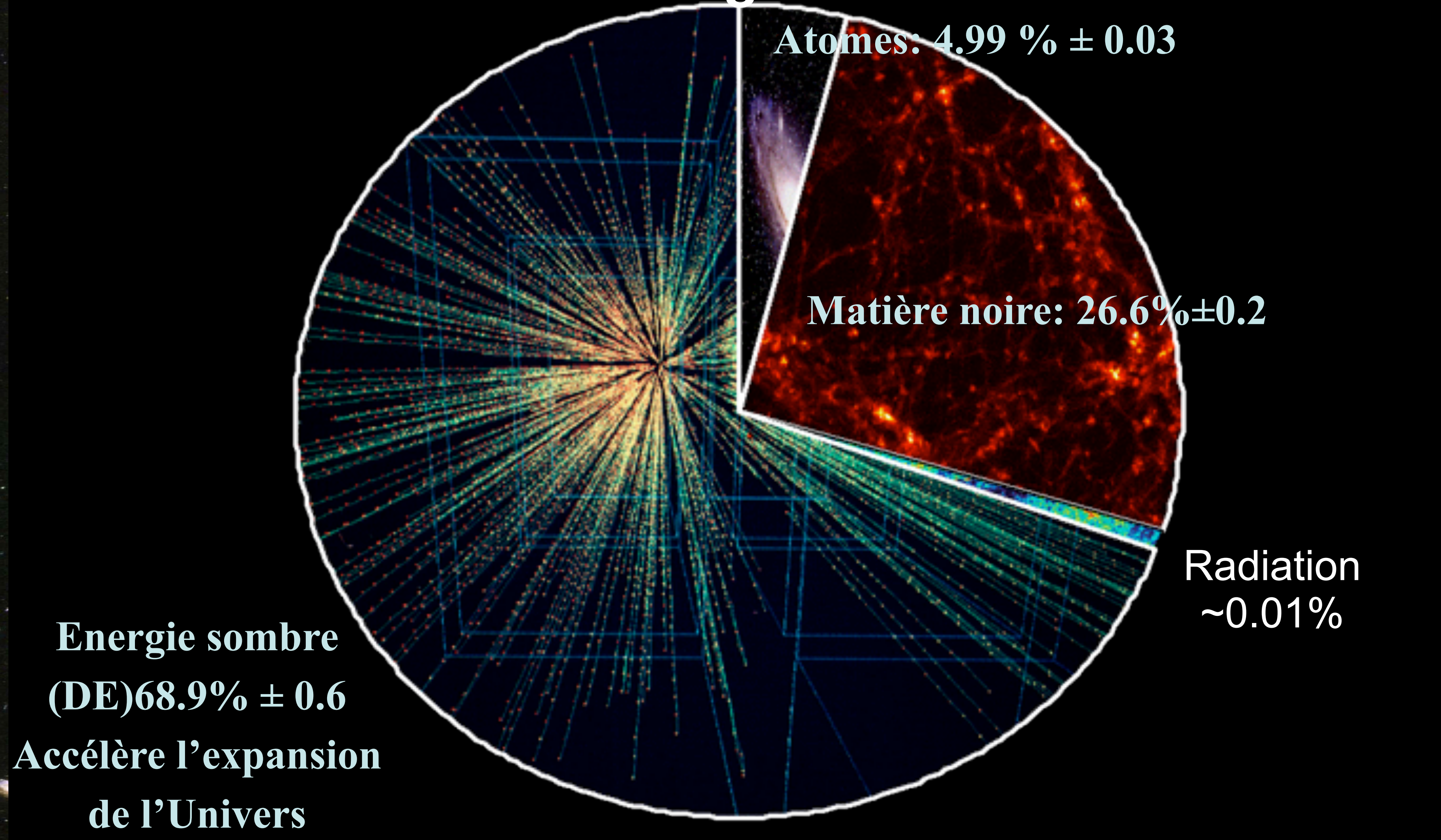
Inhomogénéités initiales
de même importance,
quelle que soit leur taille

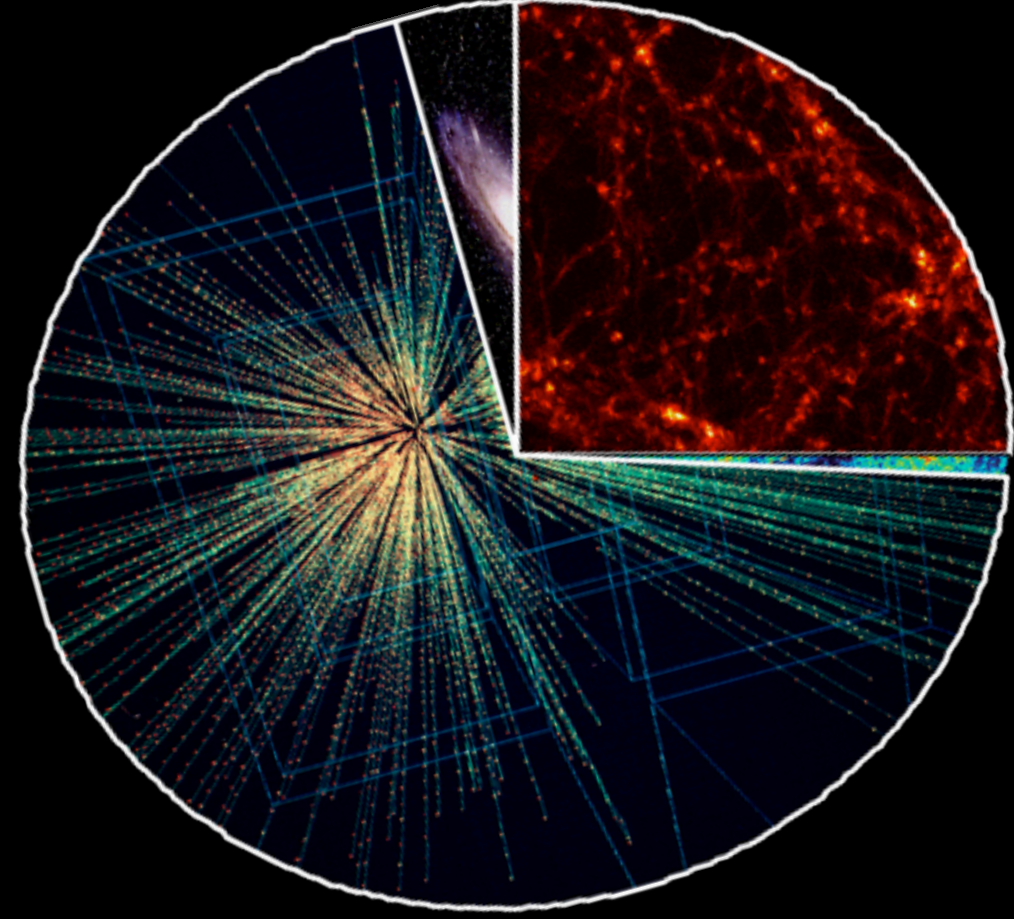
Intensité et position des
pics: ingrédients
présents dans l'Univers

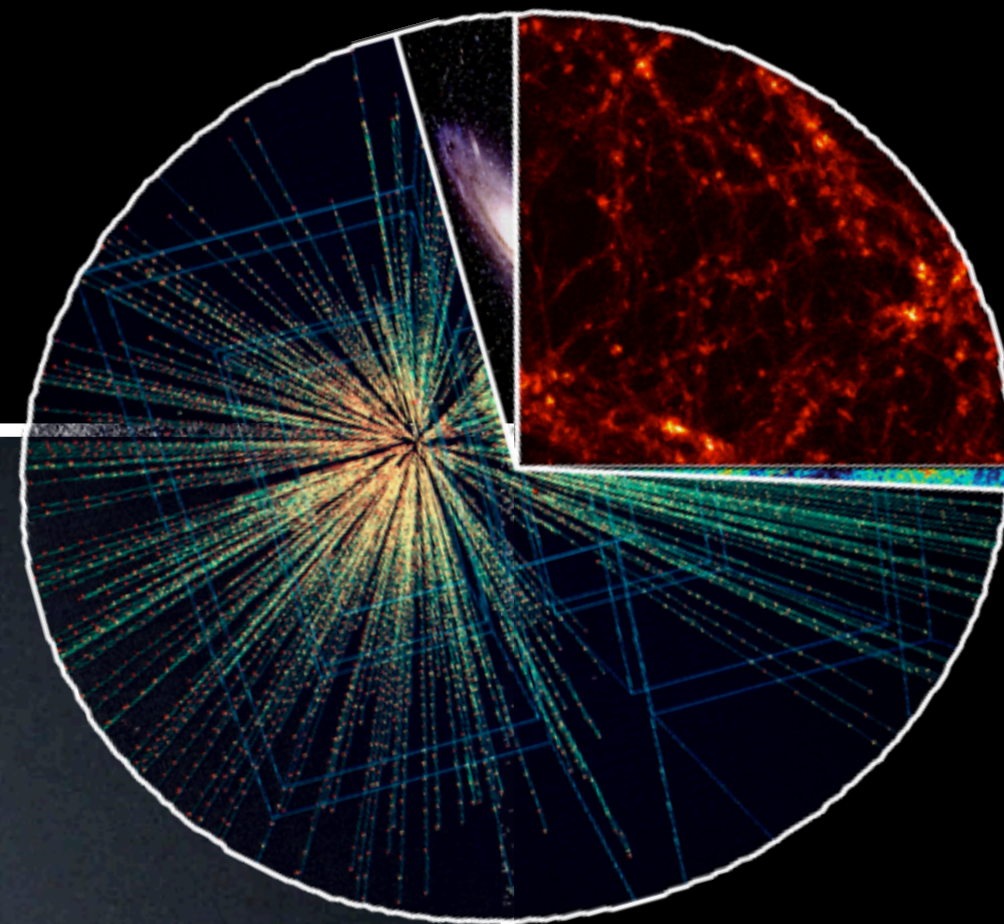
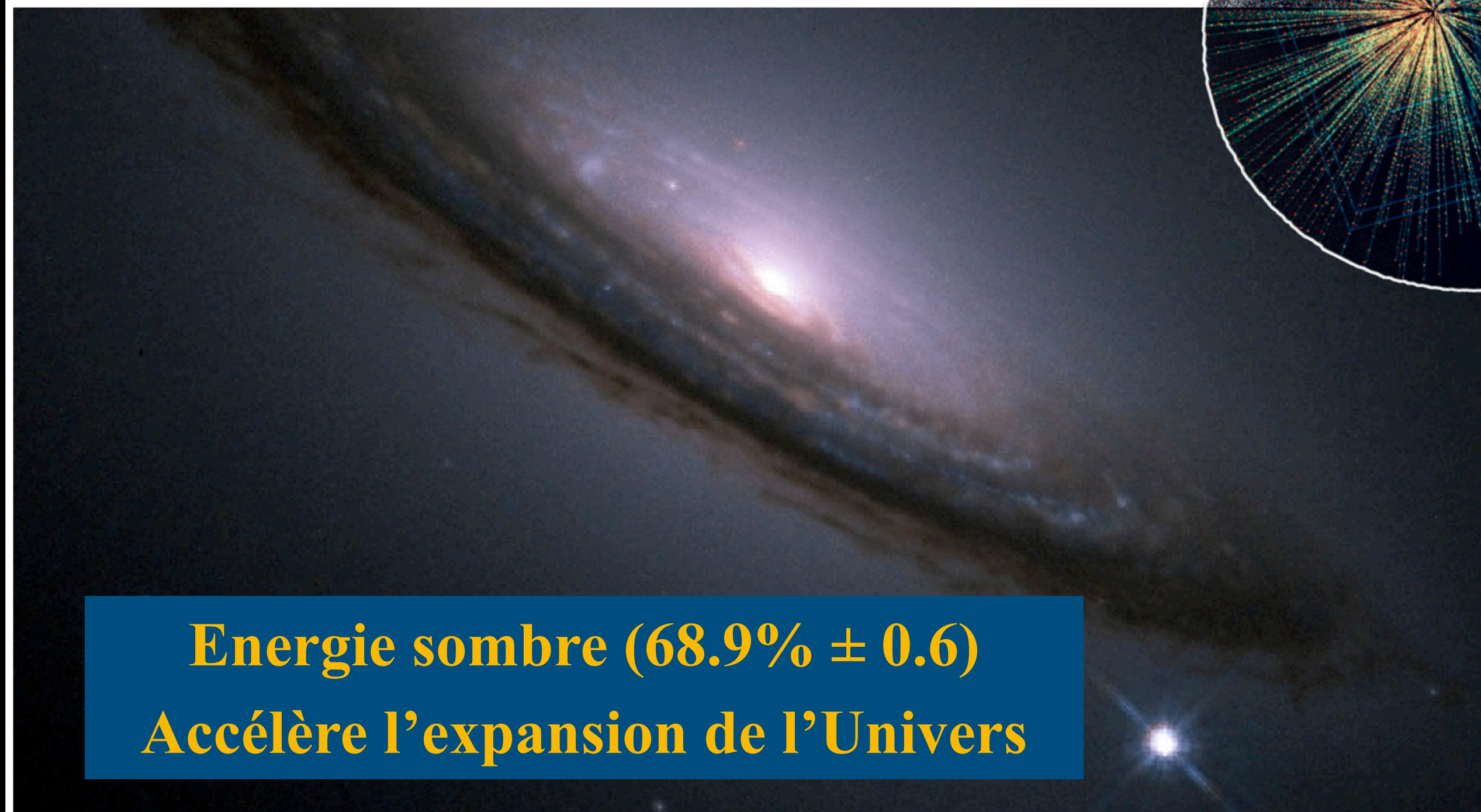
Mais quel est le mécanisme
à l'origine de ces fluctuations de densité ?

La théorie du Big-Bang

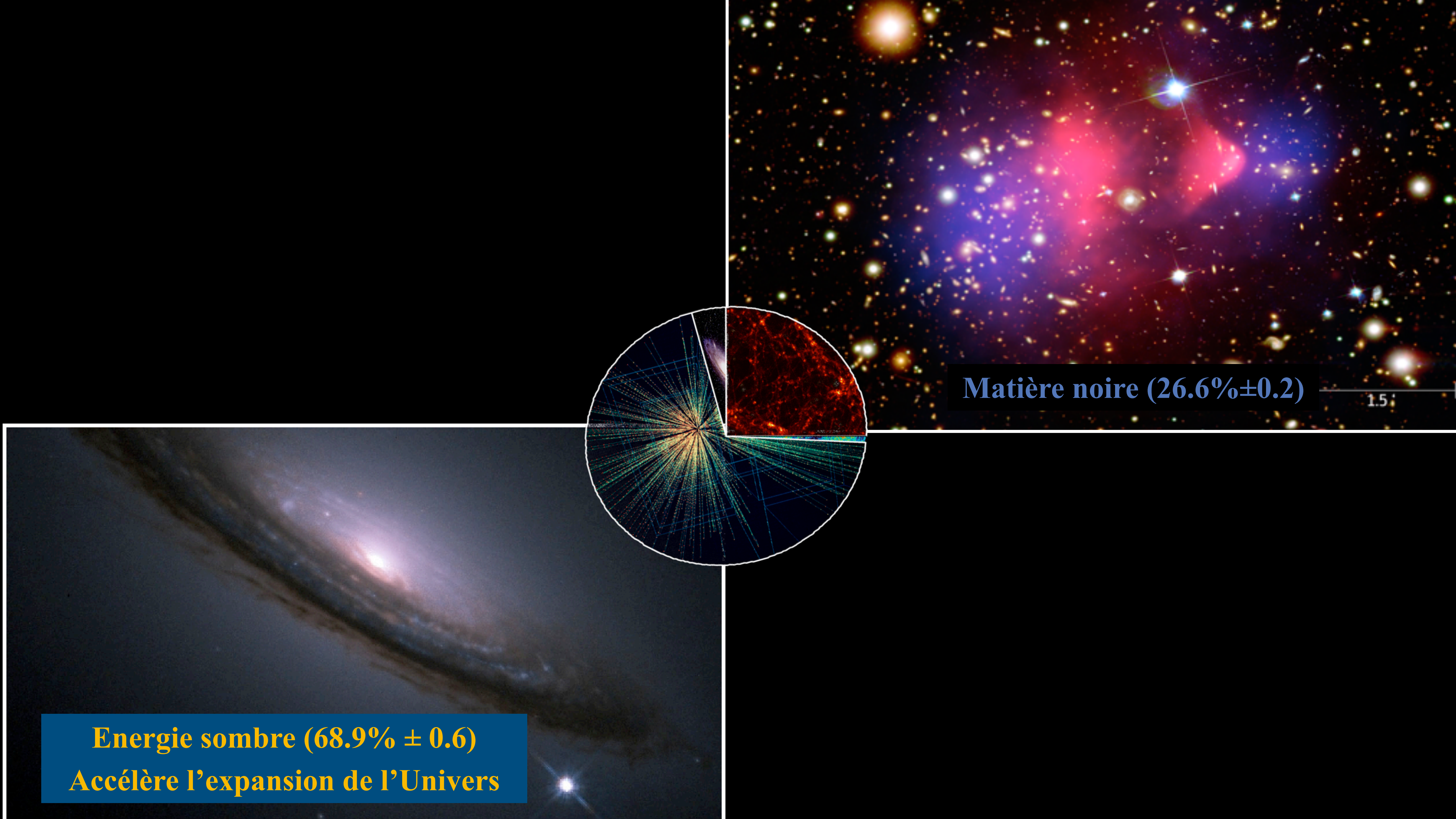
Preuve 3: Le fond diffus cosmologie







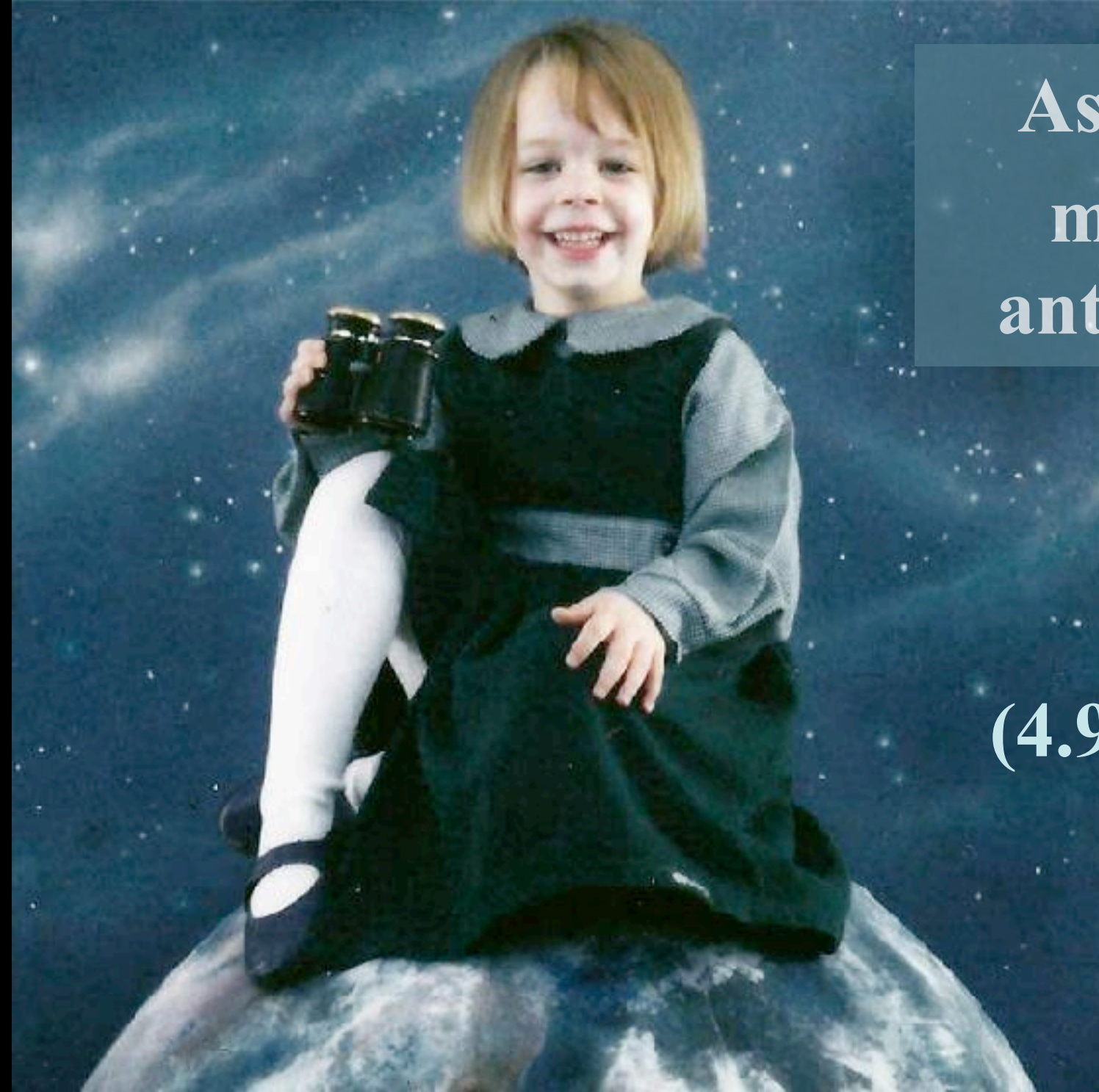
Energie sombre (68.9% \pm 0.6)
Accélère l'expansion de l'Univers



Matière noire (26.6%±0.2)

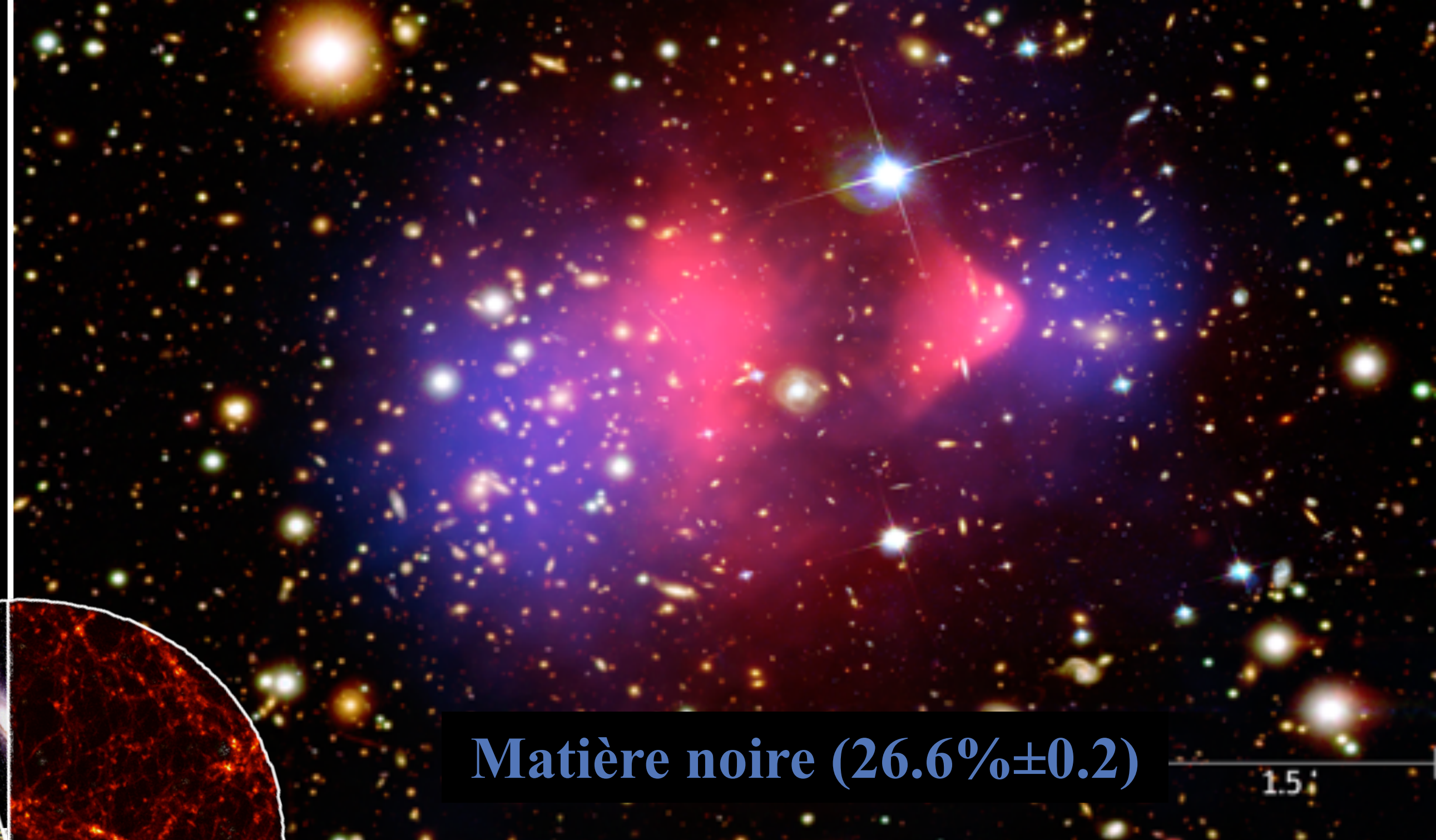
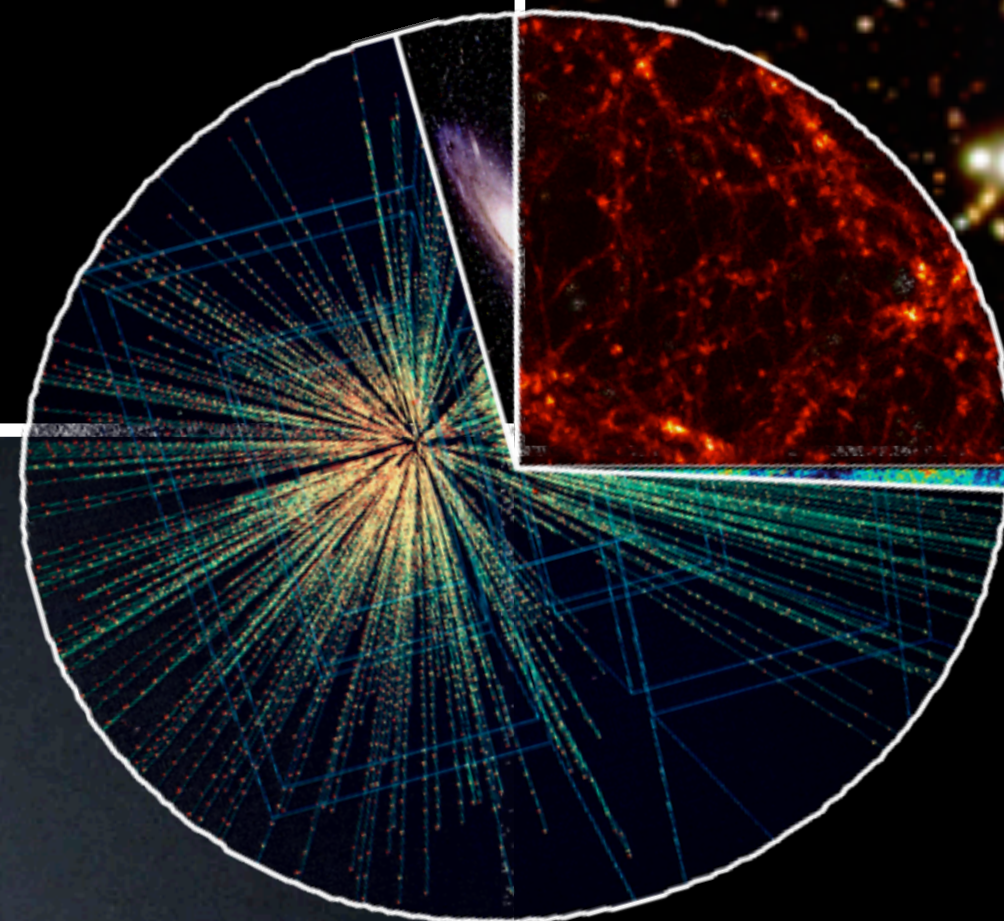
1.5'

Energie sombre (68.9% ± 0.6)
Accélère l'expansion de l'Univers



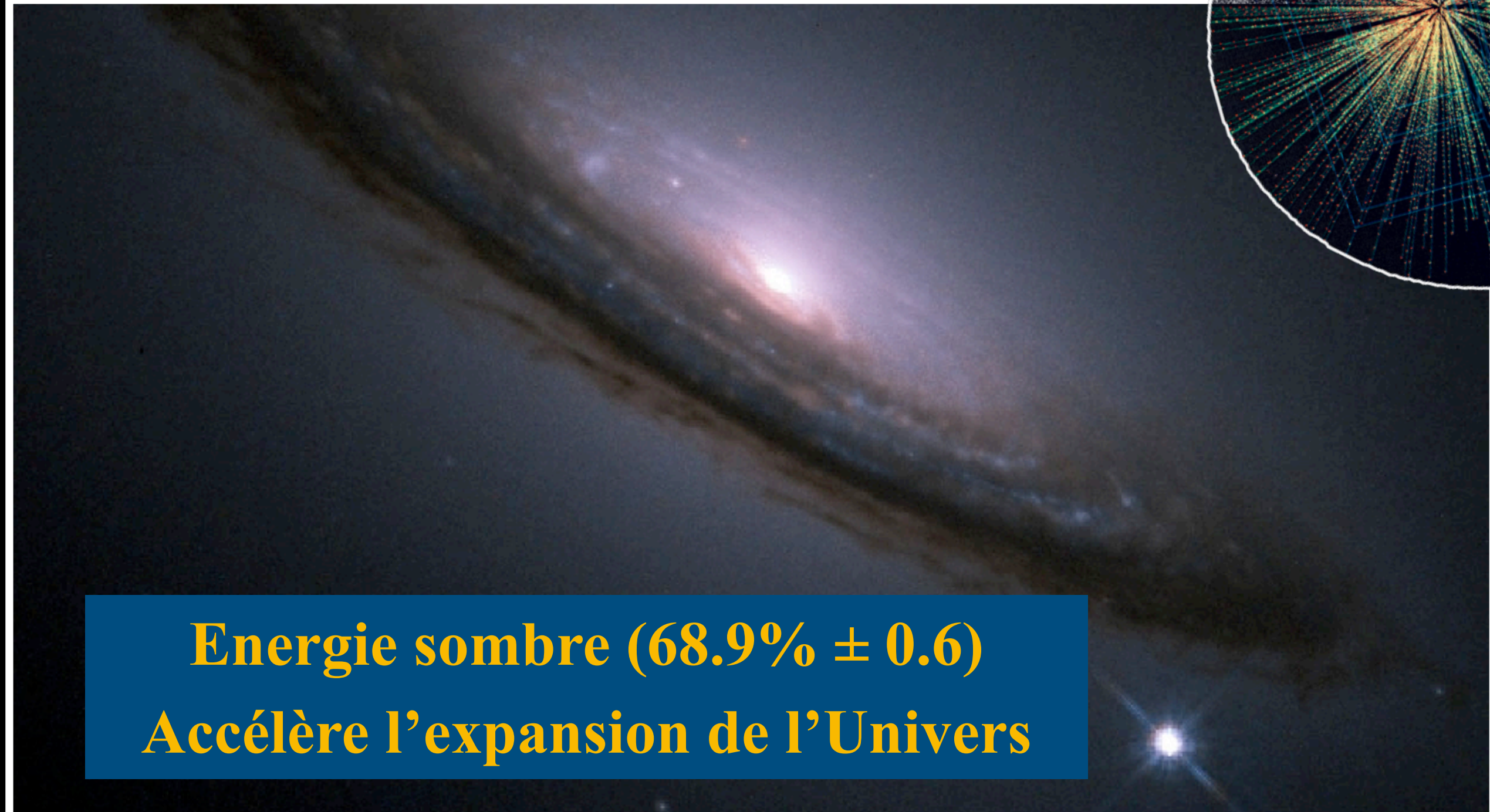
Asymétrie
matière-
antimatière

Atomes
(4.99 % \pm 0.03)

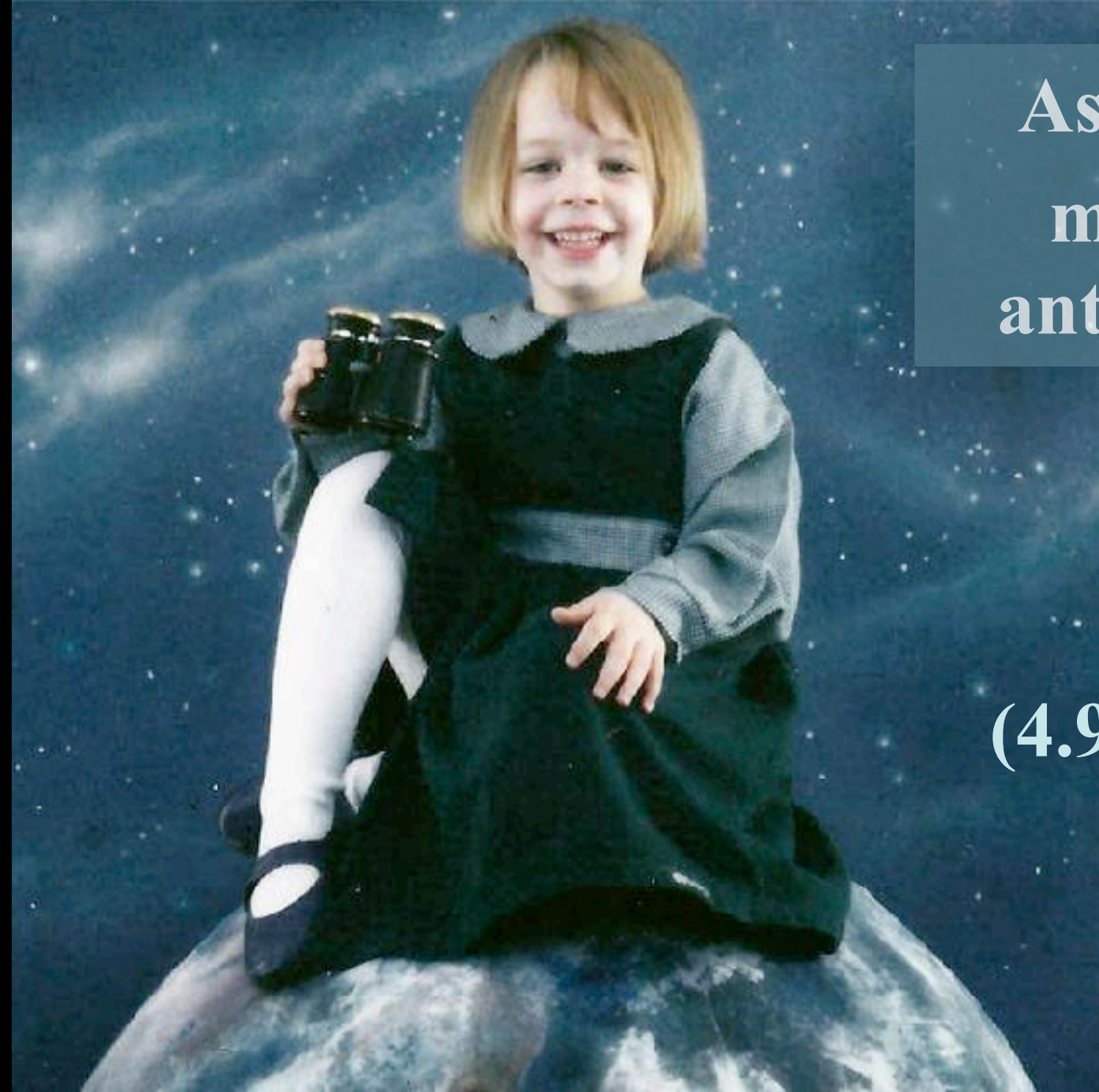


Matière noire (26.6% \pm 0.2)

1.5

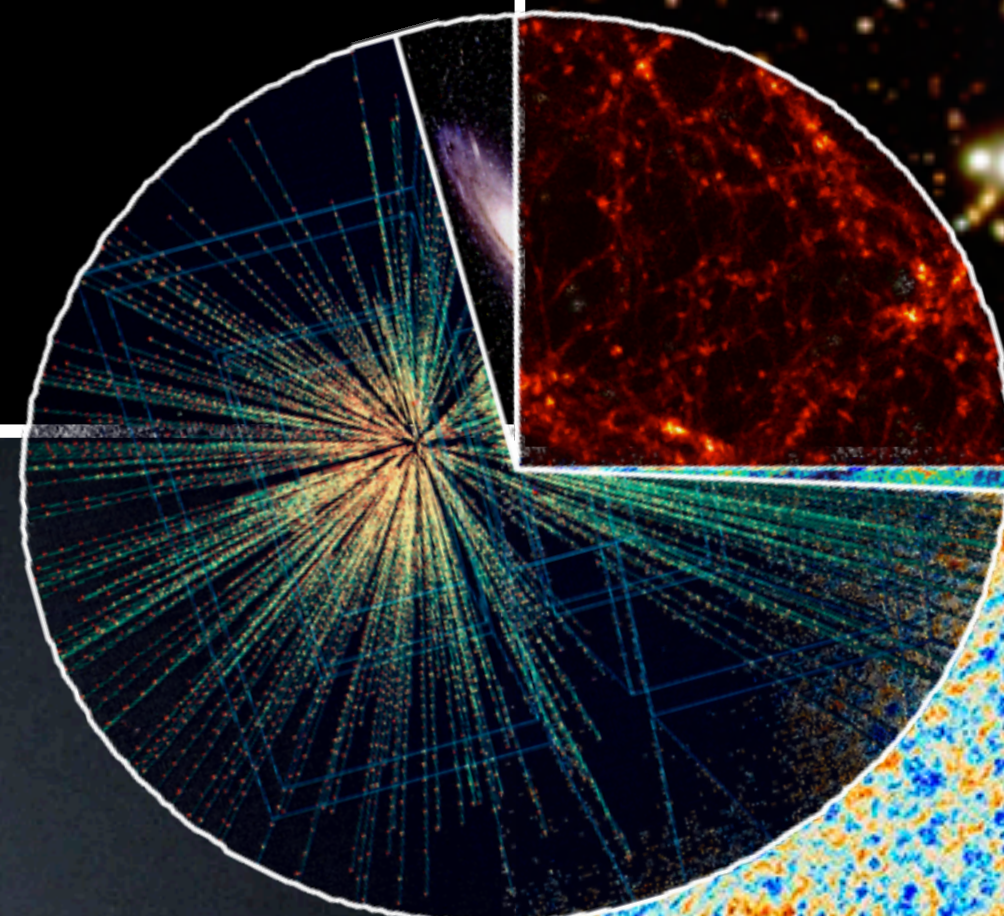


Energie sombre (68.9% \pm 0.6)
Accélère l'expansion de l'Univers



Asymétrie
matière-
antimatière

Atomes
(4.99 % \pm 0.03)



Matière noire (26.6% \pm 0.2)

1.5'

Radiation
 \sim 0.01%

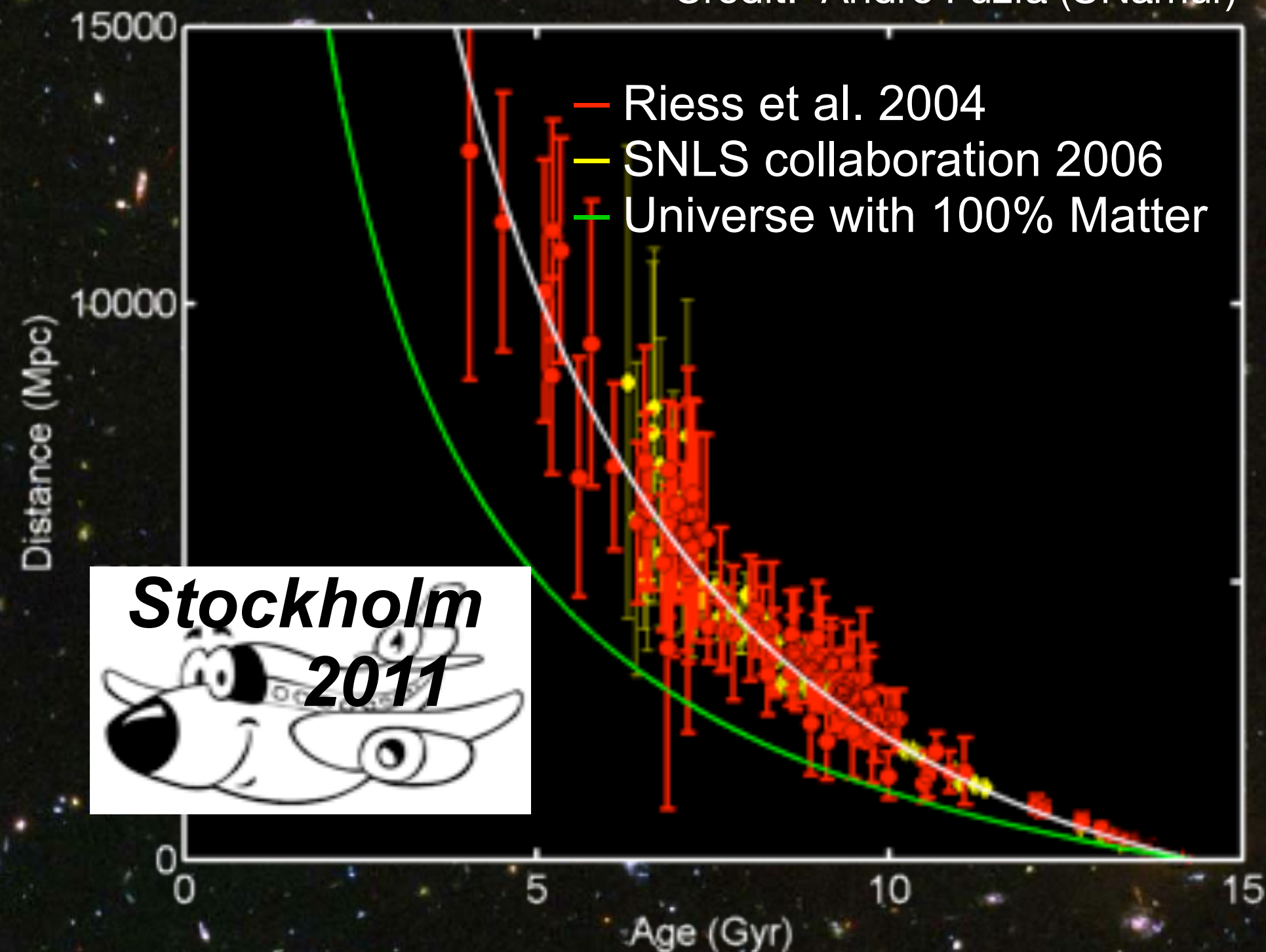
Energie sombre (68.9% \pm 0.6)
Accélère l'expansion de l'Univers

Big-Bang et
origine des structures de l'Univers

Les mystères de l'Univers

L'énergie sombre

Credit: André Füzfa (UNamur)



**Les Supernovae apparaissent
moins brillantes que prévu!**

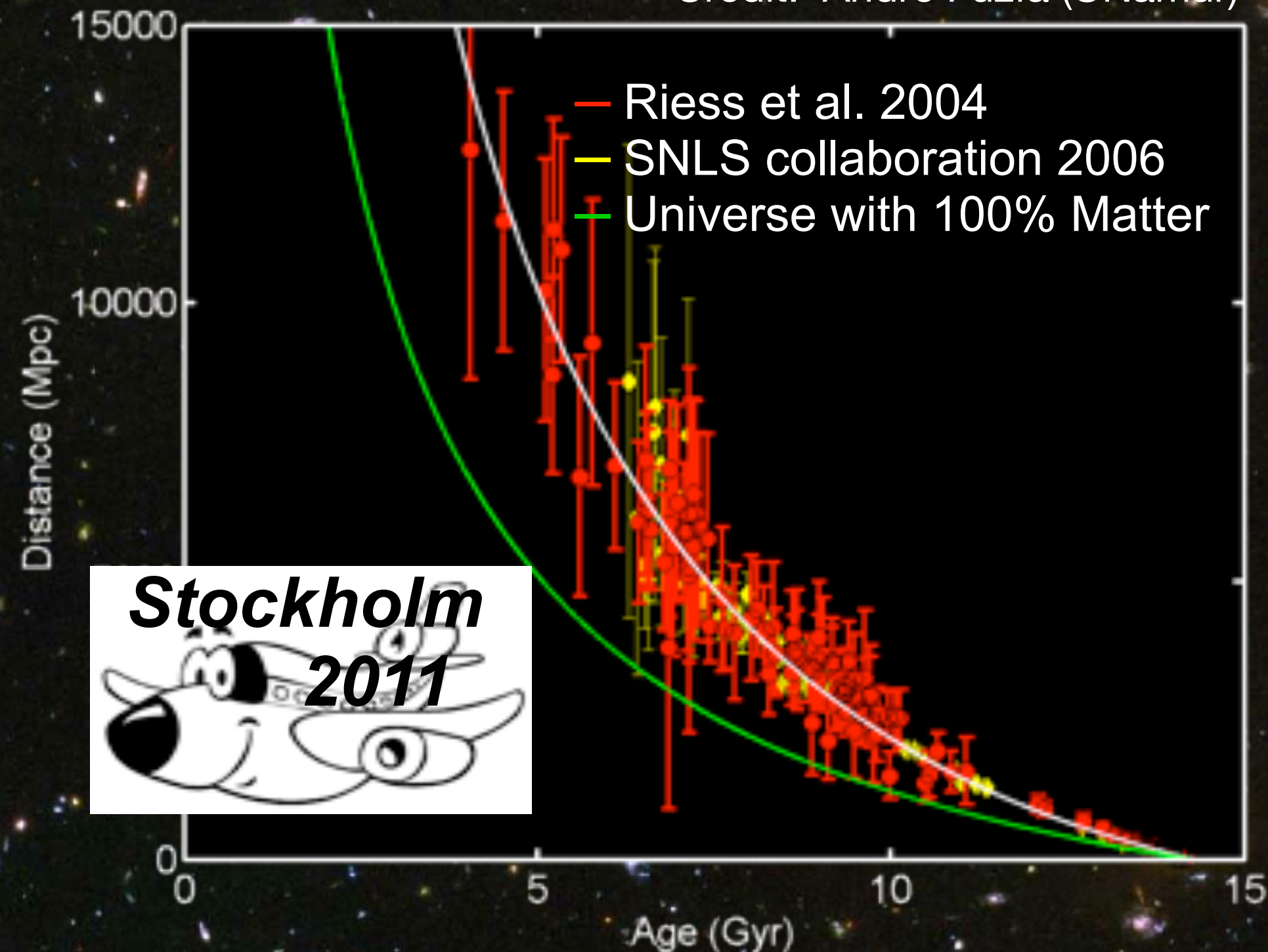
↓
Elles sont plus éloignées que prévu

↓
**L'expansion cosmique a accéléré!
Energie sombre**

Les mystères de l'Univers

L'énergie sombre

Credit: André Füzfa (UNamur)



**Les Supernovae apparaissent
moins brillantes que prévu!**

↓
Elles sont plus éloignées que prévu

↓
**L'expansion cosmique a accéléré!
Energie sombre**

Modification de la Gravité

**Constante cosmologique
Energie du vide**

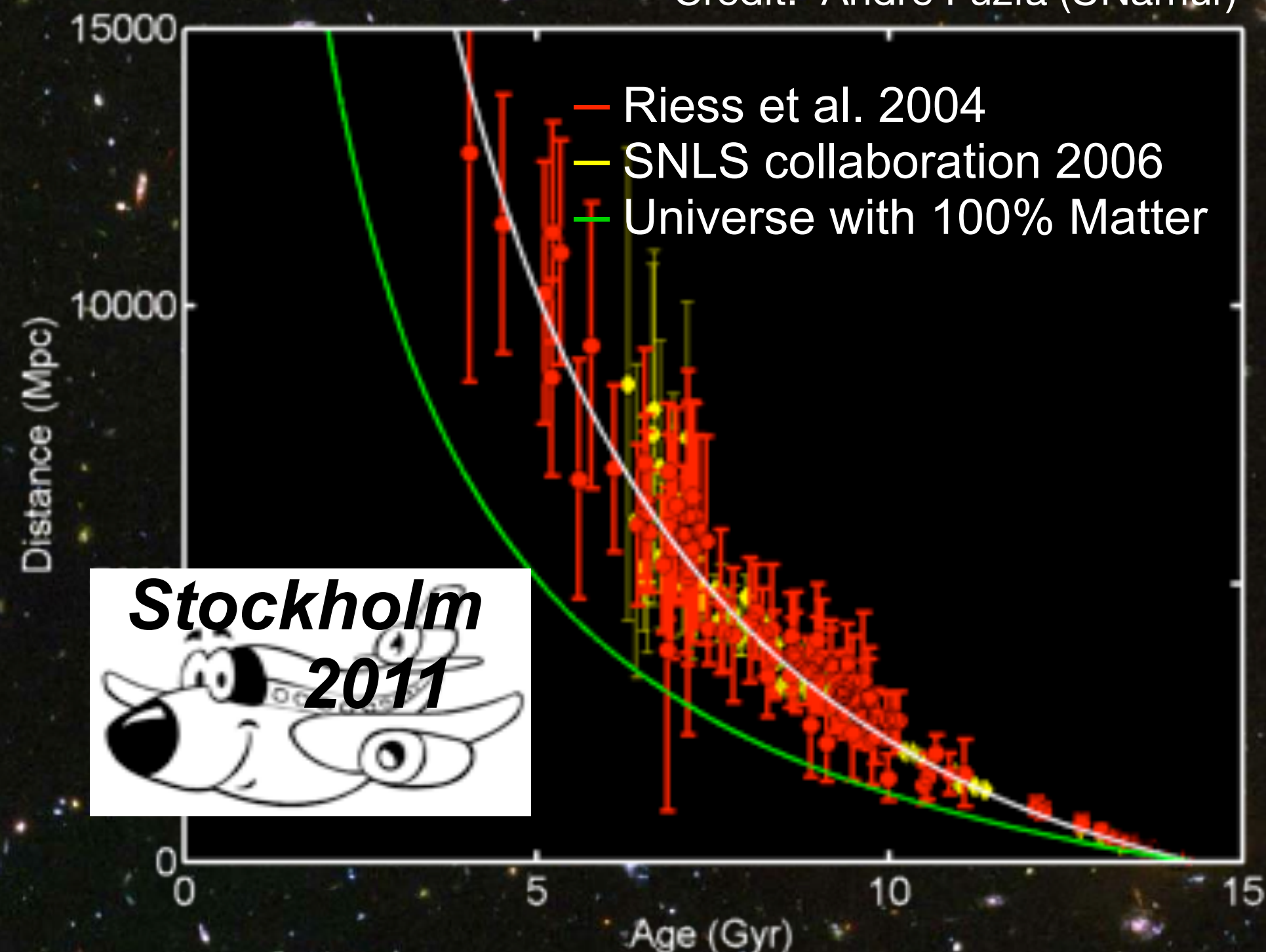
Nouveau composant

**Effets complexes
De la relativité générale**

Les mystères de l'Univers

L'énergie sombre

Credit: André Füzfa (UNamur)



**Les Supernovae apparaissent
moins brillantes que prévu!**

↓
Elles sont plus éloignées que prévu

↓
**L'expansion cosmique a accéléré!
Energie sombre**

Stockholm



Modification de la Gravité

Constante cosmologique
Energie du vide

Nouveau composant

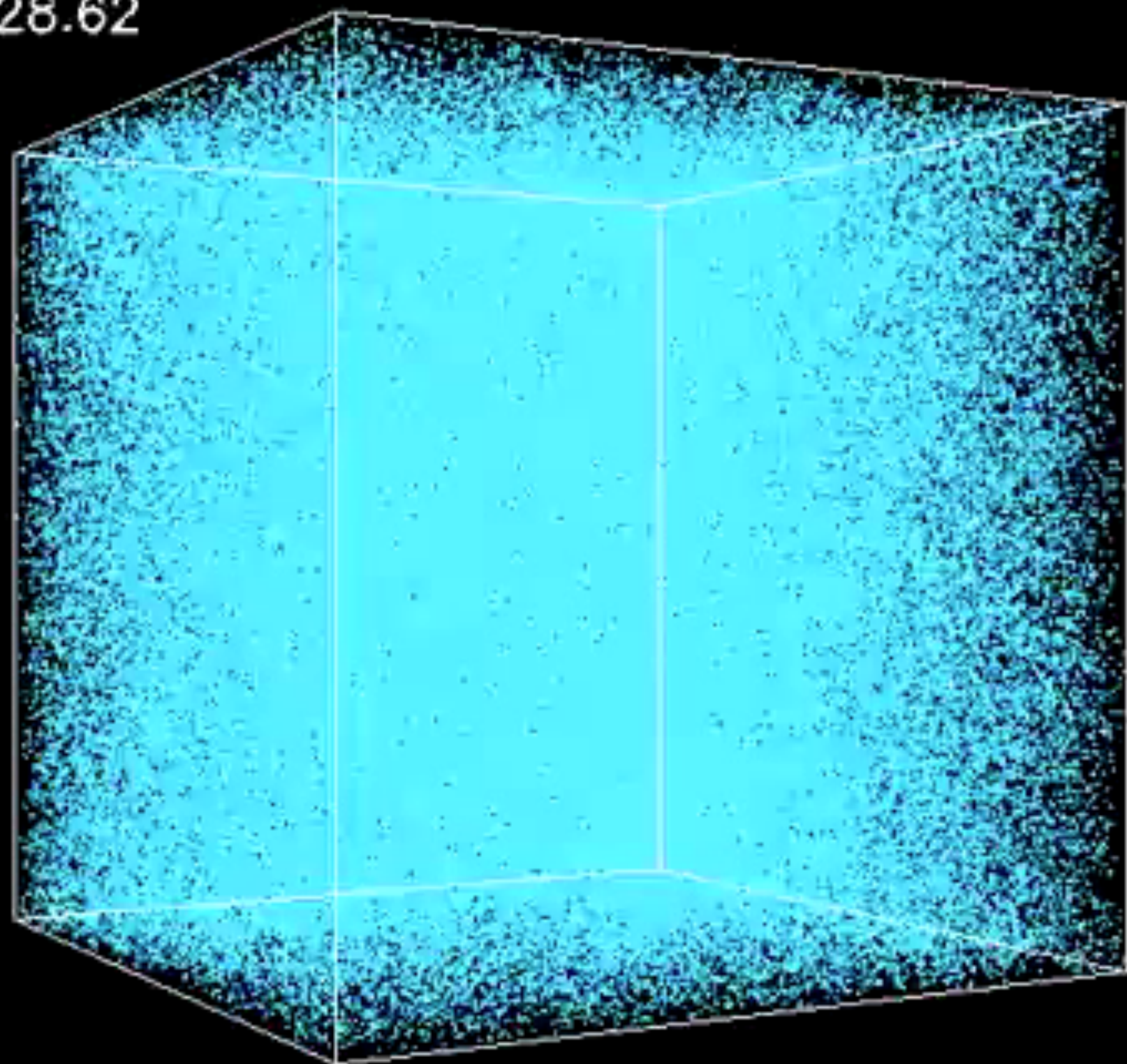
Effets complexes
De la relativité générale

Les mystères de l'Univers

Le télescope spatial Euclid

Plus de 2 milliards de galaxies!
sur tout le ciel et 13 milliards d'années!

$Z=28.62$



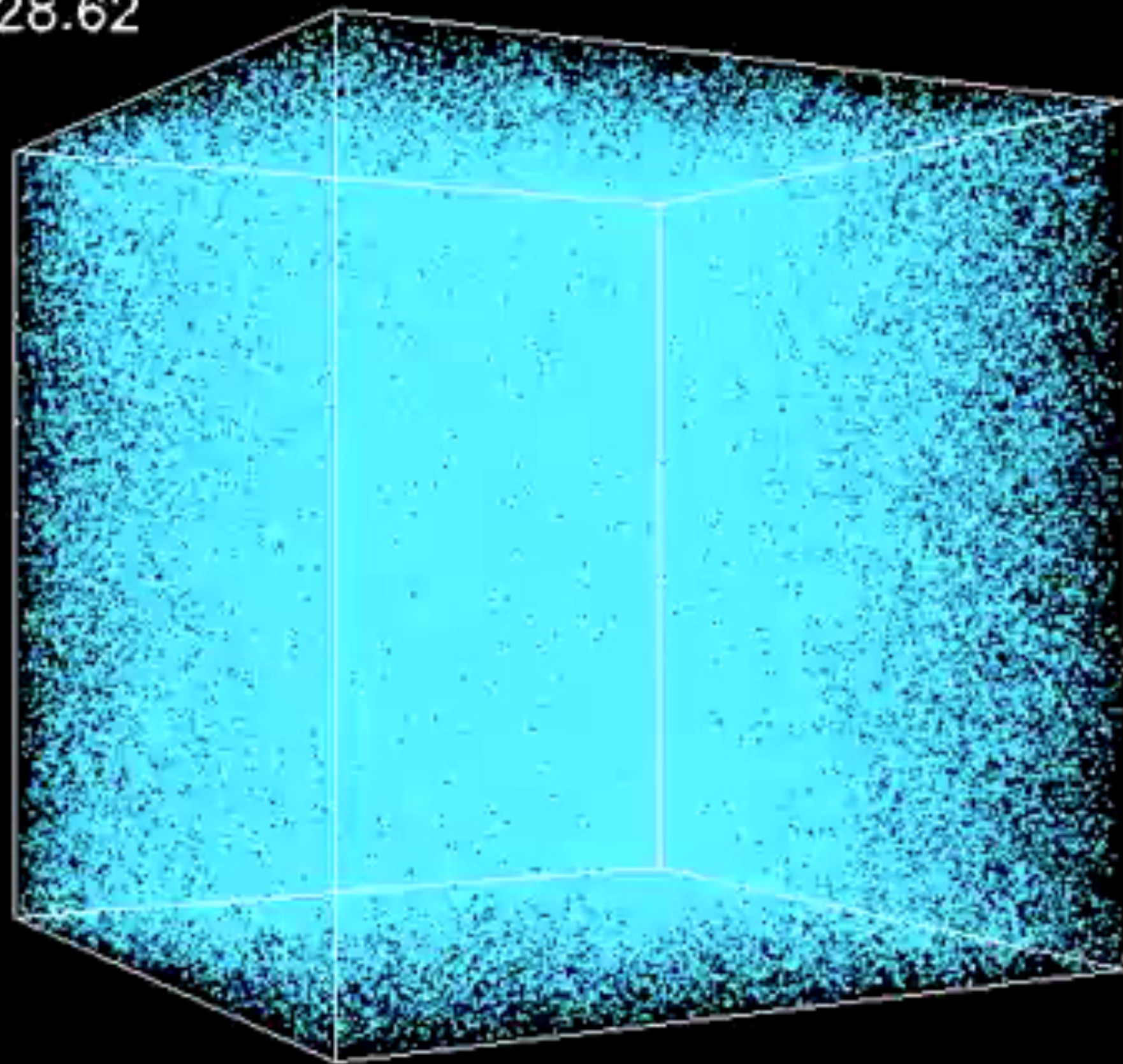
Euclid au Centre Spatial de Liège, 09/2021, source: ESA

Les mystères de l'Univers

Le télescope spatial Euclid

Plus de 2 milliards de galaxies!
sur tout le ciel et 13 milliards d'années!

$Z=28.62$



Euclid au Centre Spatial de Liège, 09/2021, source: ESA

Les mystères de l'Univers

La matière noire



Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non



Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non
- Particules massives interagissant faiblement (WIMP) ?

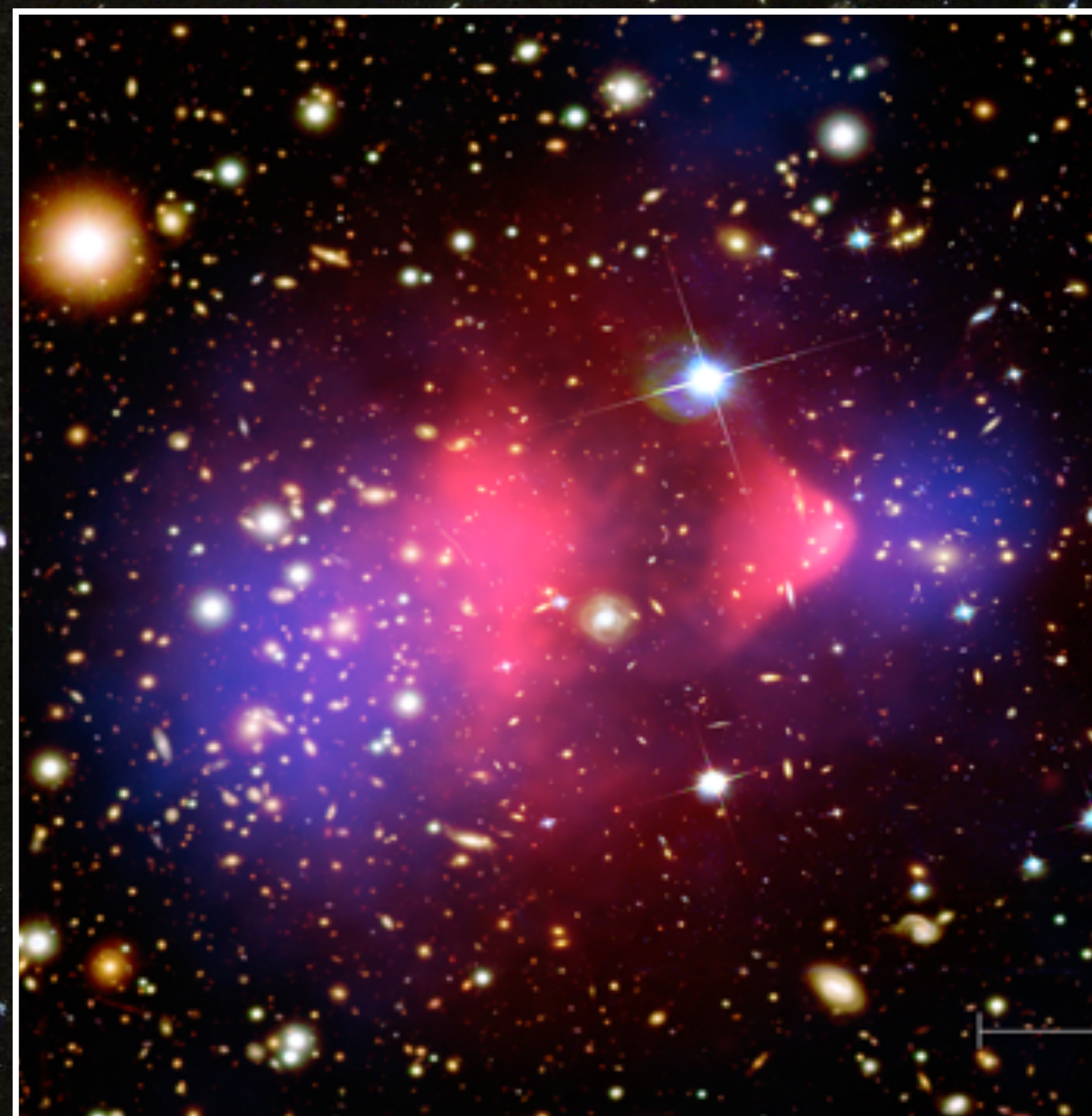


Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non
- Particules massives interagissant faiblement (WIMP) ?
- Autre particule (axion,...) ?

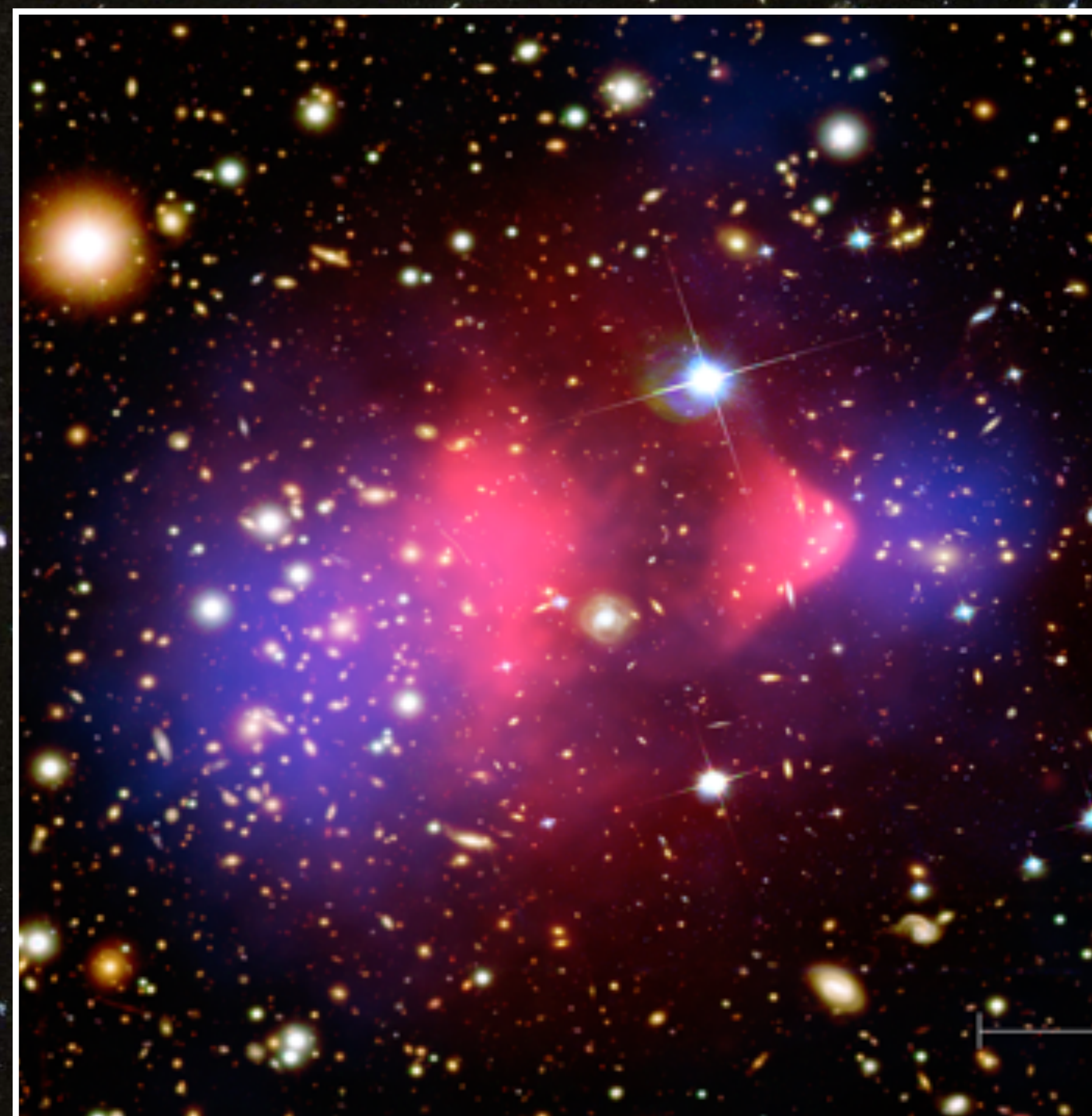


Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non
- Particules massives interagissant faiblement (WIMP) ?
- Autre particule (axion,...) ?
- Modification de la gravité ?



Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non
- Particules massives interagissant faiblement (WIMP) ?
- Autre particule (axion,...) ?
- Modification de la gravité ?
- Macho's
(Objets Compacts Massifs dans les halos galactiques)

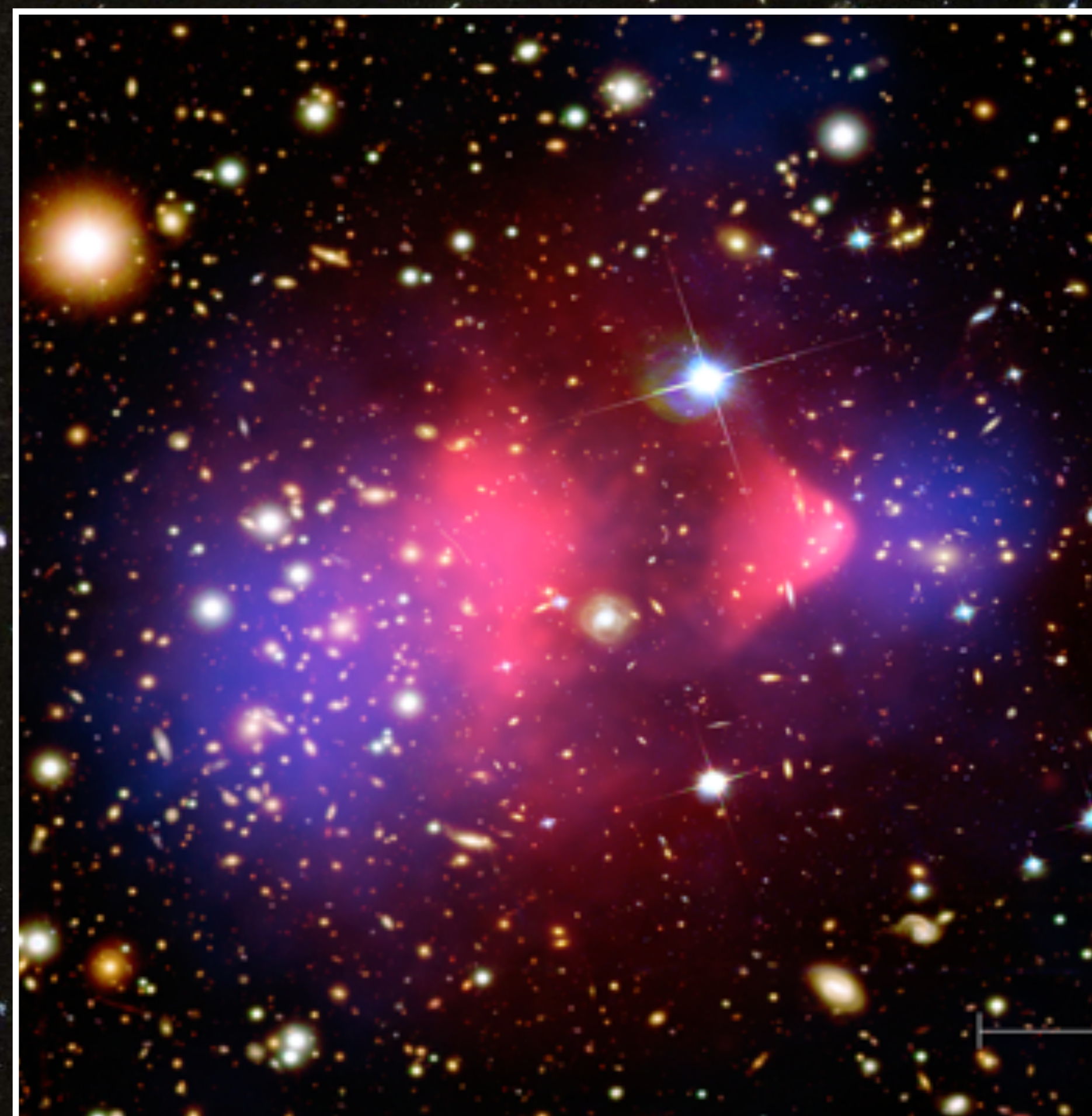


Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

La matière noire

- Neutrino ? Non
- Particules massives interagissant faiblement (WIMP) ?
- Autre particule (axion,...) ?
- Modification de la gravité ?
- Macho's
(Objets Compacts Massifs dans les halos galactiques)
- Trous noirs primordiaux



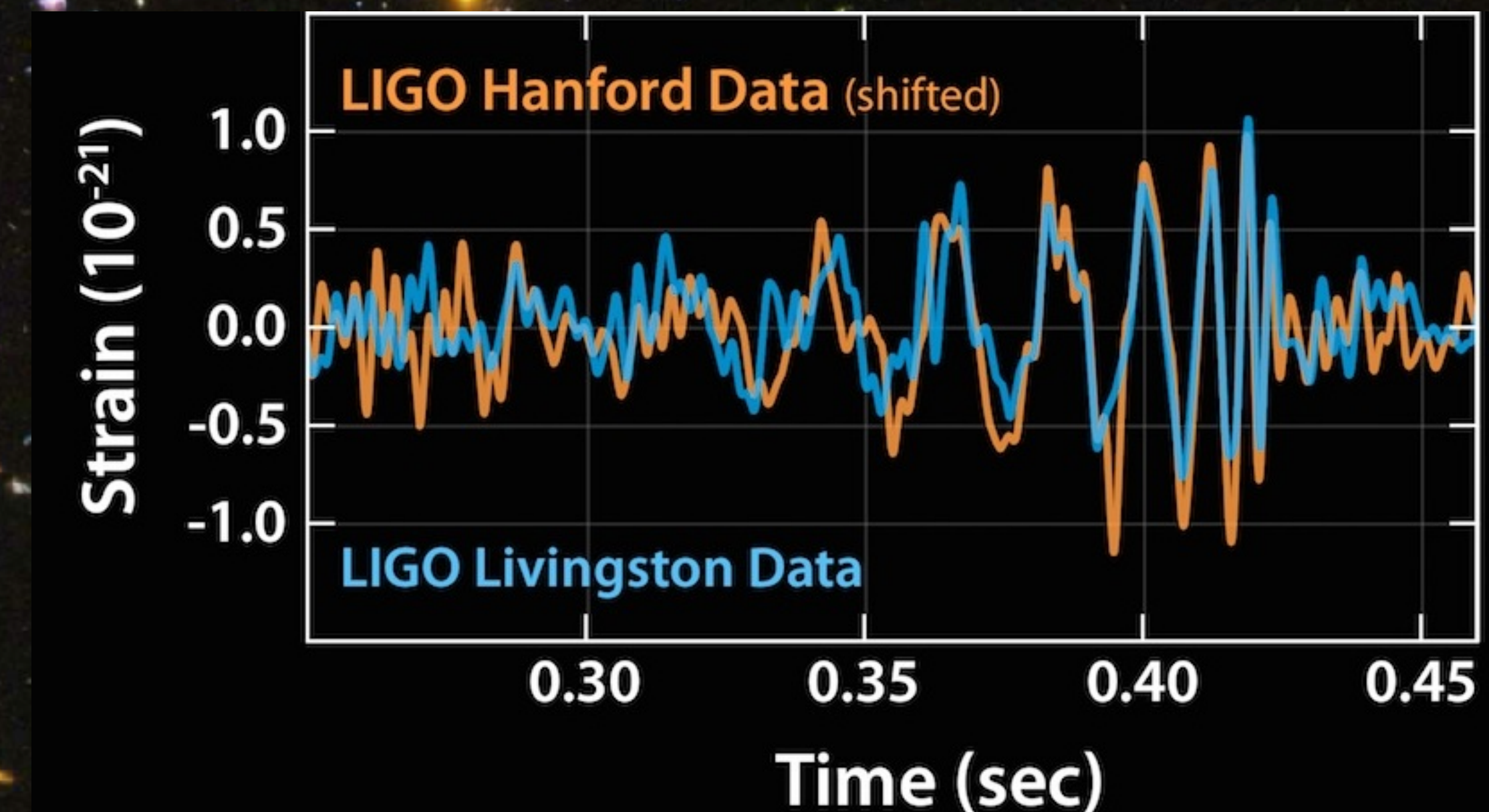
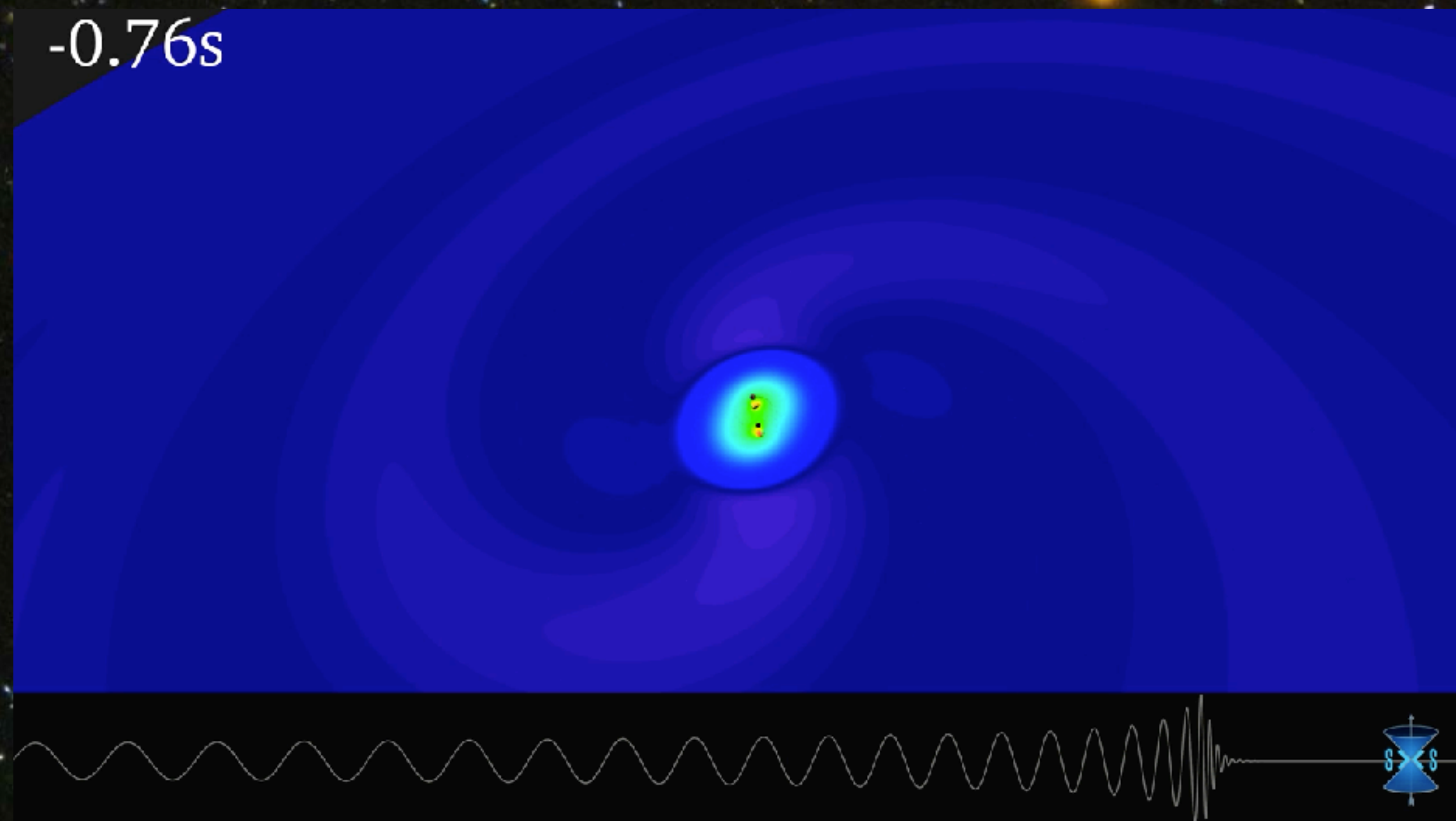
Bullet cluster - Matière noire (bleu) vs matière ordinaire (rose)

Les mystères de l'Univers

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles



Septembre 2015: Première détection
d'ondes gravitationnelles

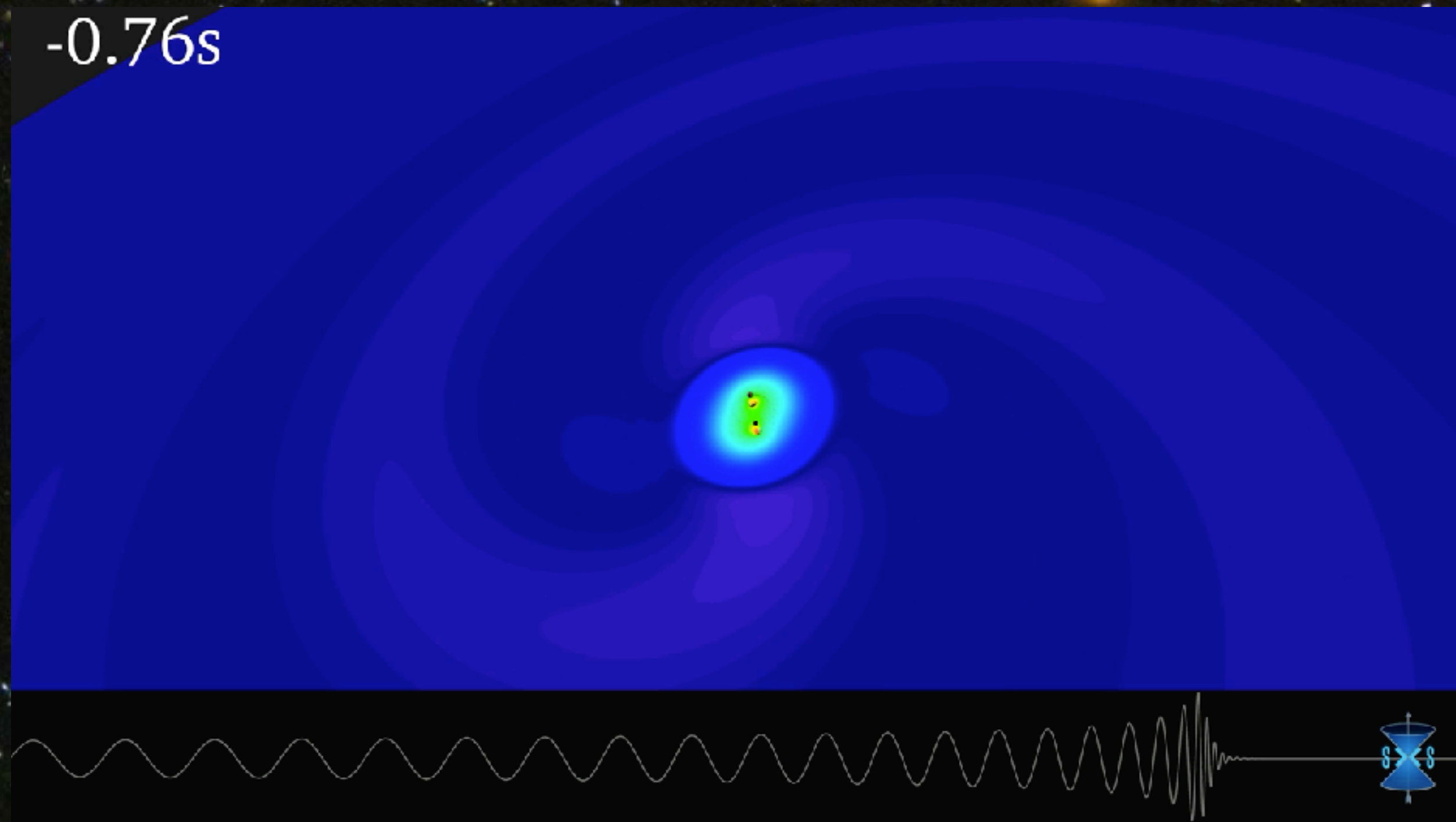


Trou noir 1 + Trou noir 2
36 masses solaires 29 masses solaires
= Trou noir 62 masses solaires
+ ondes gravitationnelles

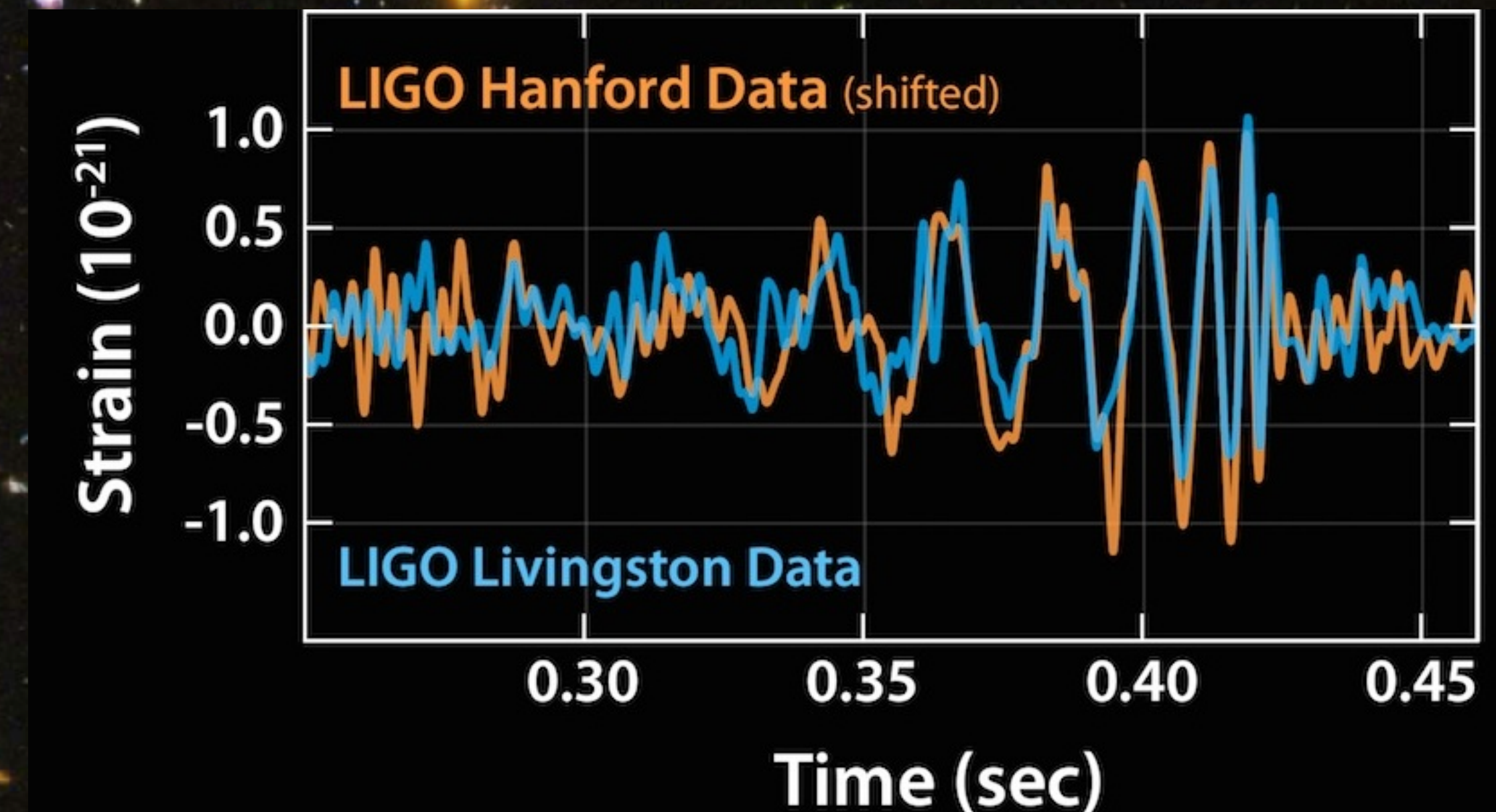
Depuis, 90 détections de fusions de trous noirs
qui remettent en questions les modèles

Les mystères de l'Univers

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles



Septembre 2015: Première détection
d'ondes gravitationnelles



Trou noir 1 + Trou noir 2
36 masses solaires 29 masses solaires
= Trou noir 62 masses solaires
+ ondes gravitationnelles

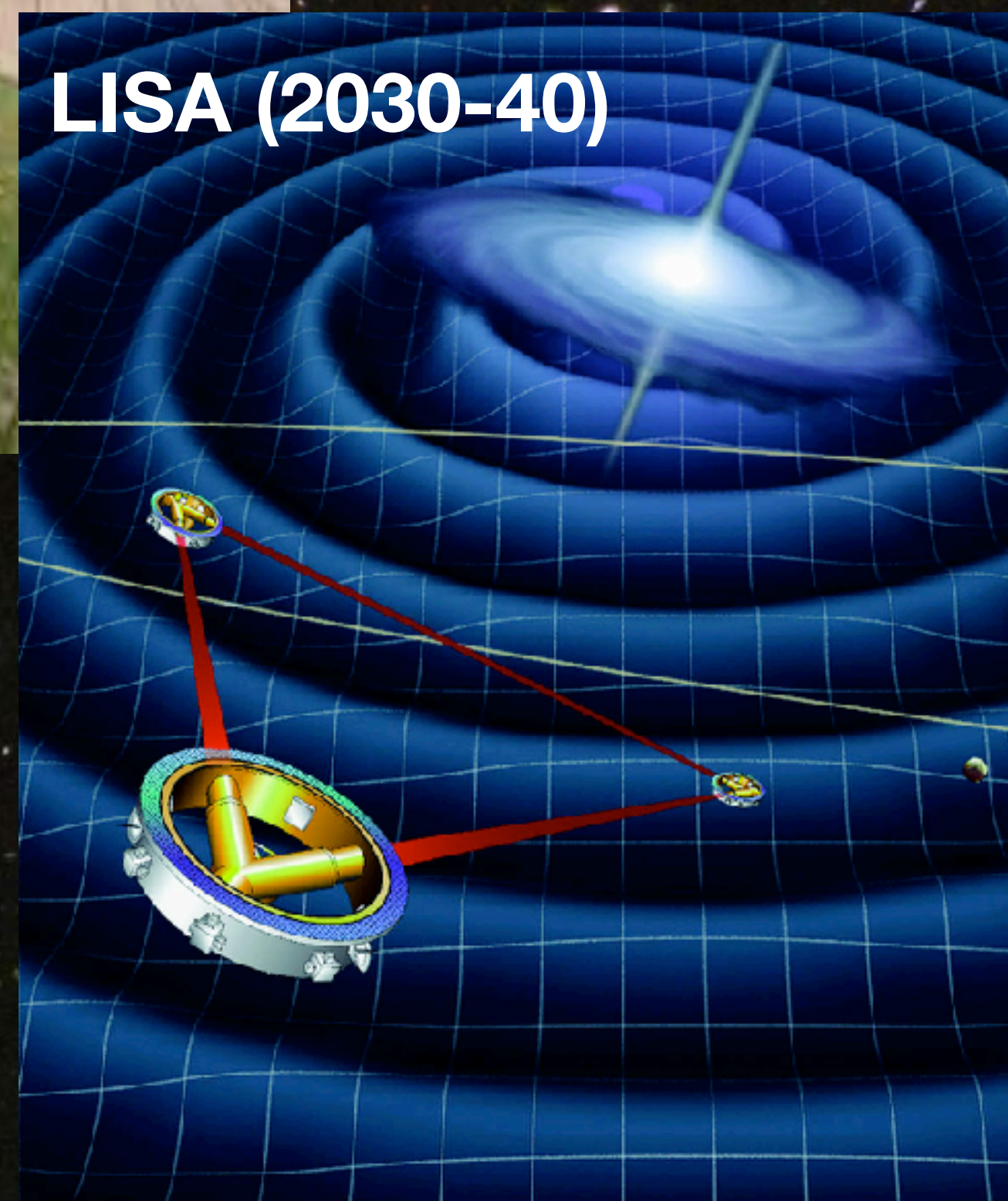
Depuis, 90 détections de fusions de trous noirs
qui remettent en questions les modèles

Les mystères de l'Univers

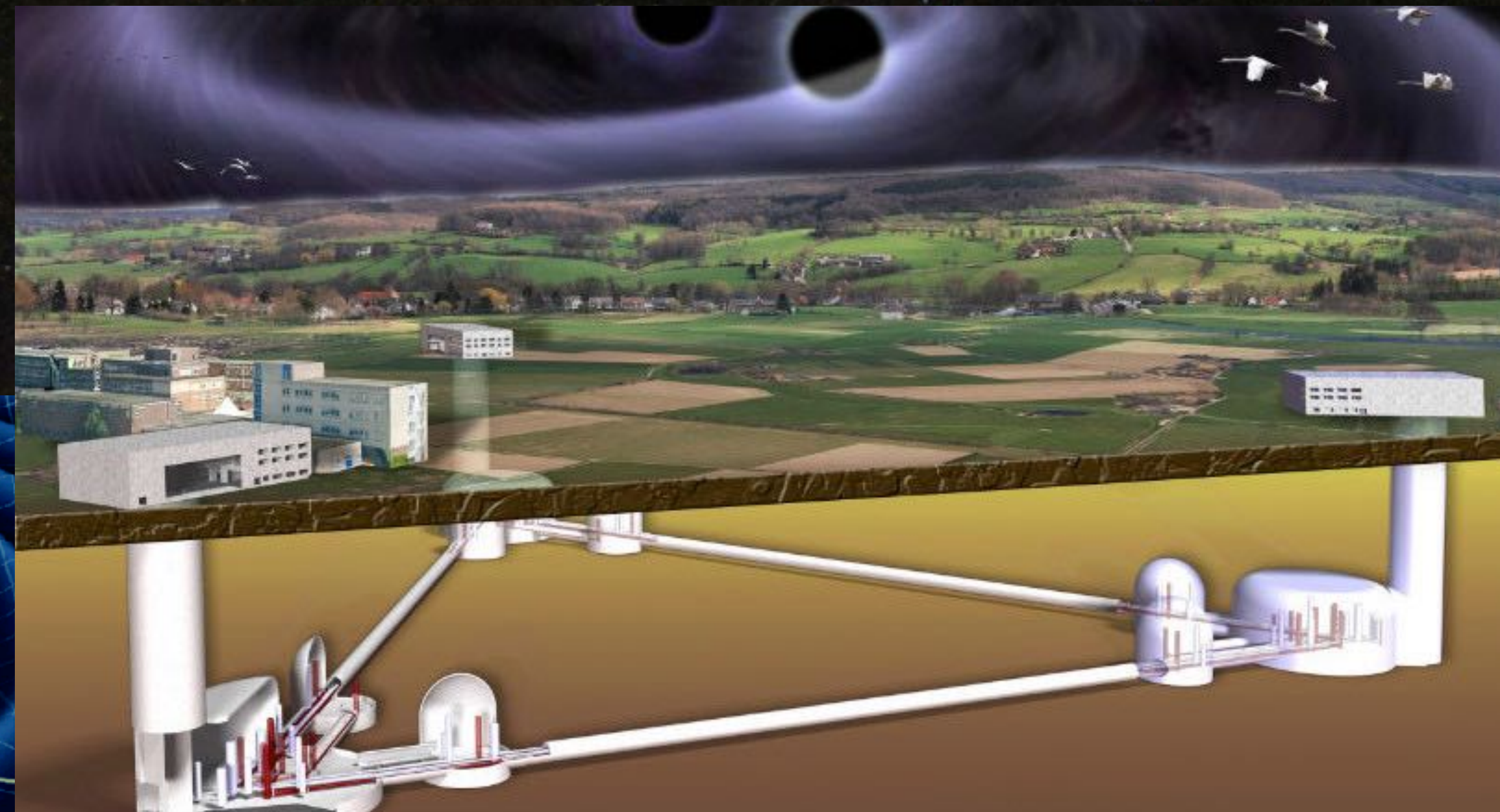
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles



LIGO/Virgo/Kagra



LISA (2030-40)



Einstein Telescope (2030-40)

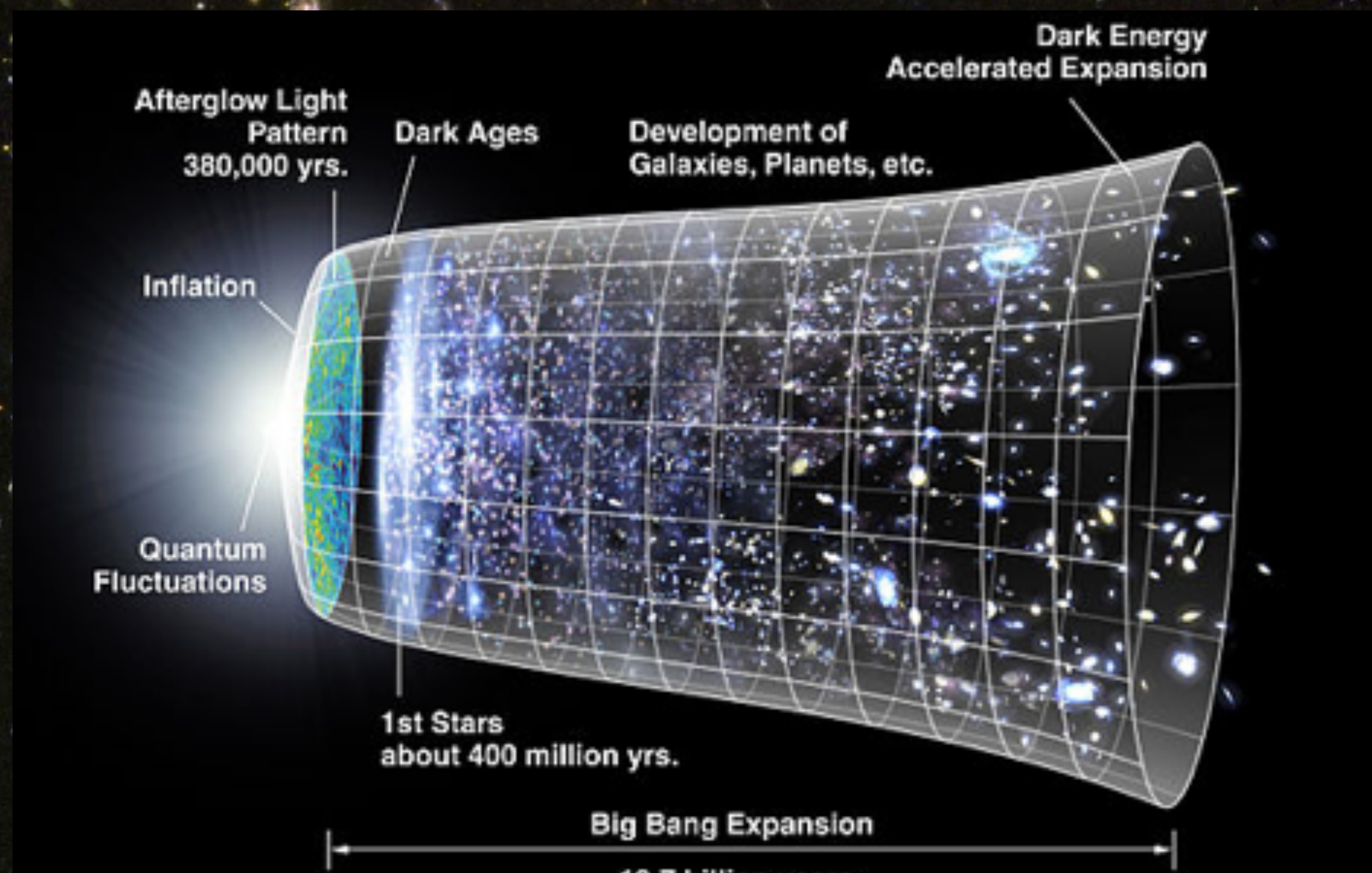
Les mystères de l'Univers

Le Big-Bang et l'inflation cosmique



Modèle du Big-Bang chaud:

en $t=0$ (il y a 13.8 milliards d'années), la densité de l'Univers devient infinie (singularité initiale - Penrose-Hawking)



Les mystères de l'Univers

Le Big-Bang et l'inflation cosmique

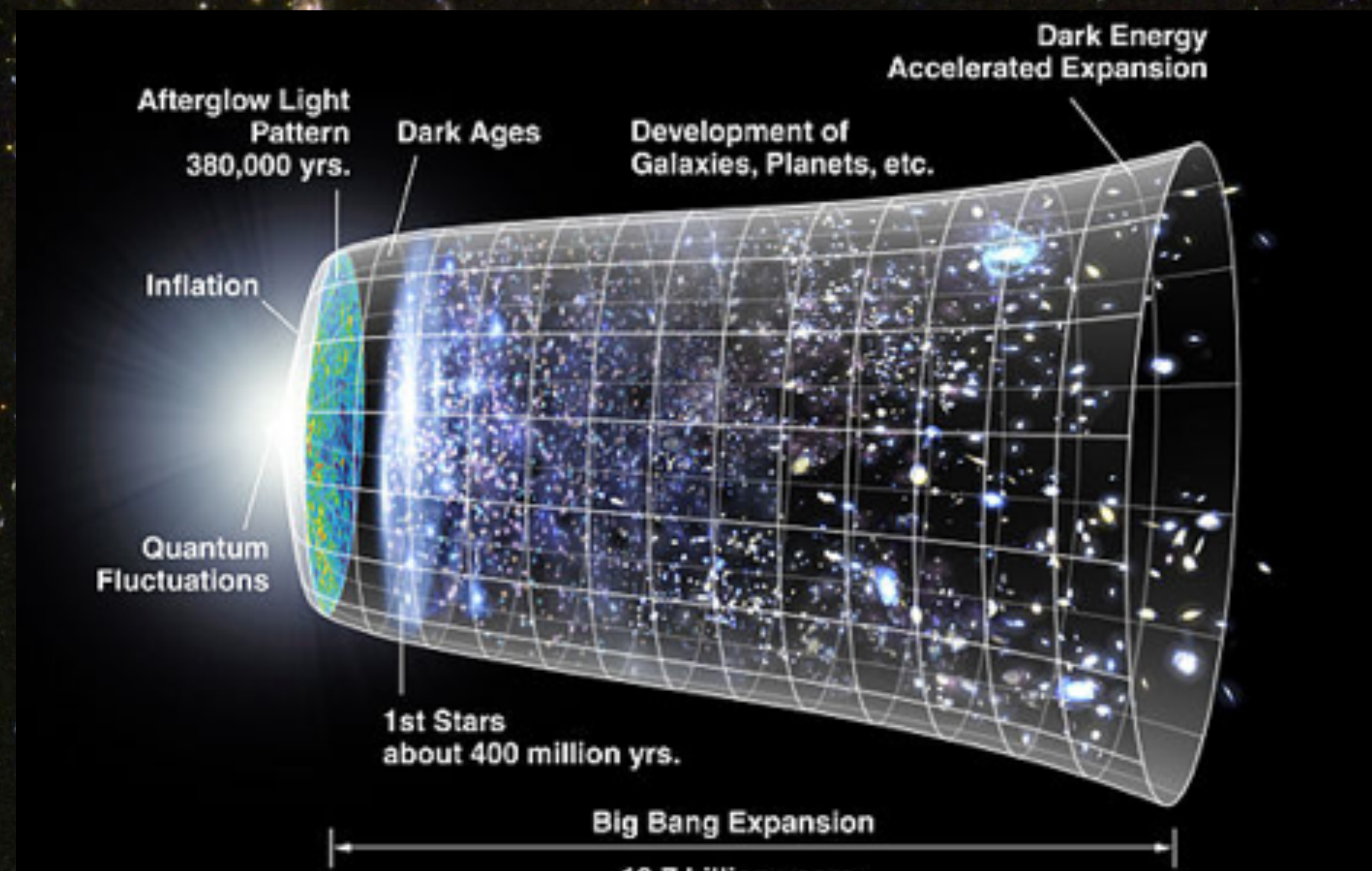


Modèle du Big-Bang chaud:

en $t=0$ (il y a 13.8 milliards d'années), la densité de l'Univers devient infinie (singularité initiale - Penrose-Hawking)

La singularité a existé uniquement si le modèle reste vrai jusqu'à $t=0$

Le Big-Bang (singularité) est une hypothèse! Tout indique qu'elle est fausse....



Les mystères de l'Univers

Le Big-Bang et l'inflation cosmique



Modèle du Big-Bang chaud:

en $t=0$ (il y a 13.8 milliards d'années), la densité de l'Univers devient infinie (singularité initiale - Penrose-Hawking)

*La singularité a existé uniquement si le modèle reste vrai jusqu'à $t=0$
Le Big-Bang (singularité) est une hypothèse! Tout indique qu'elle est fausse....*

On doit aller au delà de ce modèle:

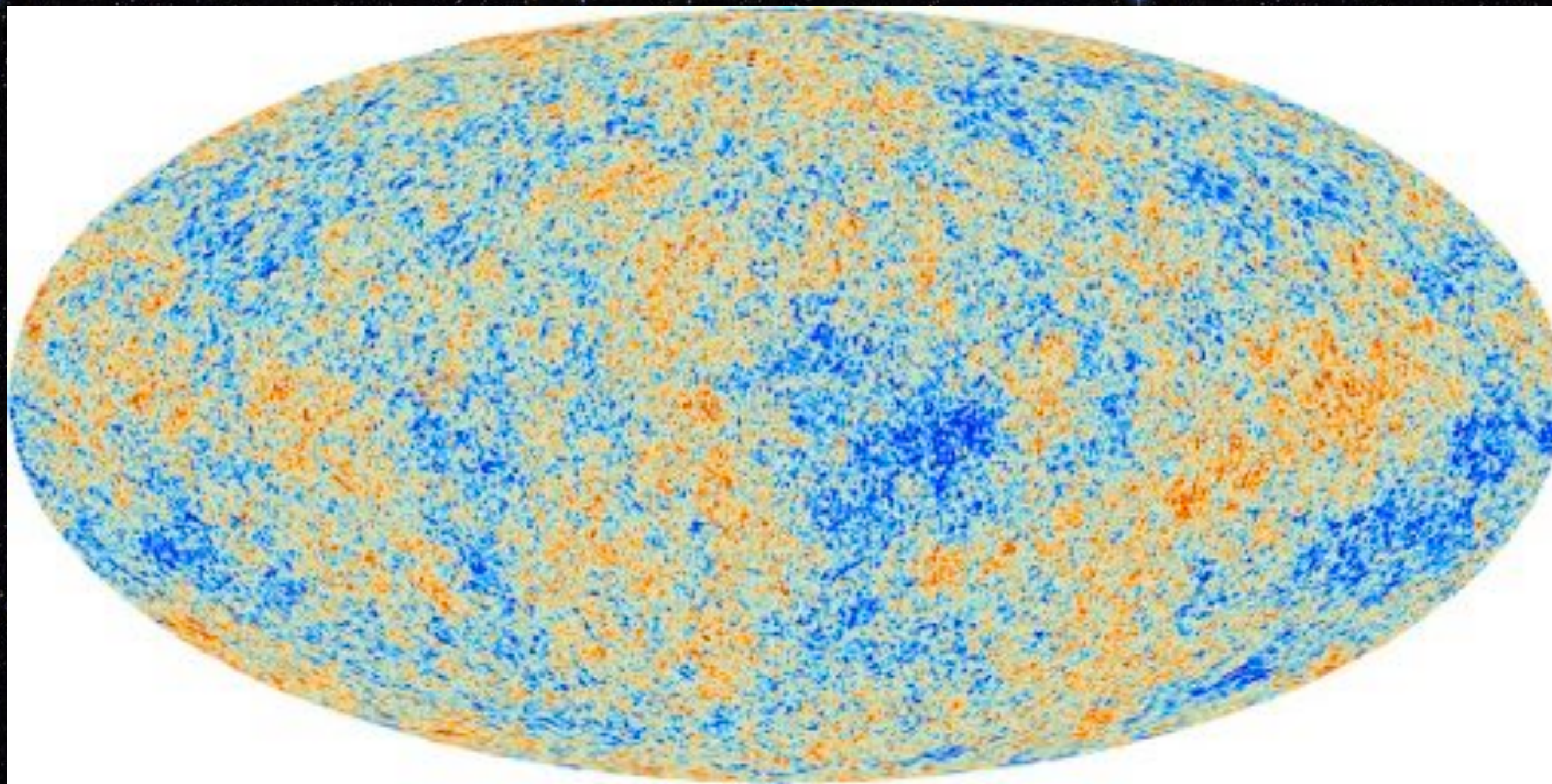
- 1. Physique inconnue au delà d'une certaine densité**
- 2. Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu (baryogenèse, leptogenèse)?**
- 3. Phases primordiales d'inflation (éternelle) ?**
- 4. L'univers est-t-il homogène au delà de l'Univers observable ?**
- 5. Relativité incompatible avec la mécanique quantique**
- 6. la singularité peut-être évitée (ex: si courbure) => remplacée par rebond**

Les mystères de l'Univers

Le Big-Bang et l'inflation cosmique

Communiquer plus vite que la lumière...

Gros problème avec la Théorie du Big-Bang ?



Fond diffus cosmologique identique (ou presque) dans différentes direction du ciel !

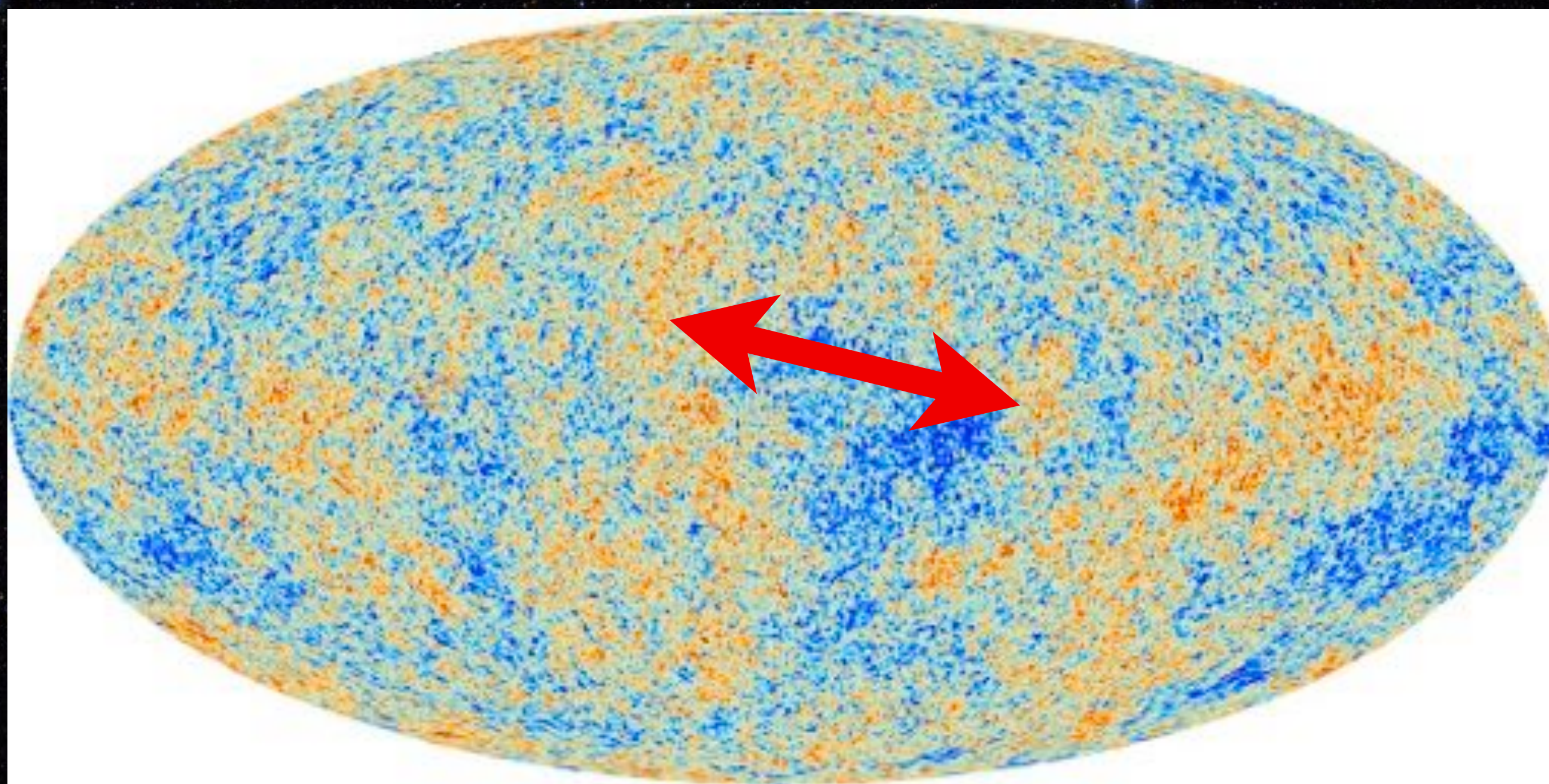
Le rayonnement provient de régions extrêmement éloignées n'ayant pas eu le temps de «communiquer» entre elles selon la théorie standard du Big-Bang : problème de l'horizon)

Les mystères de l'Univers

Le Big-Bang et l'inflation cosmique

Communiquer plus vite que la lumière...

Gros problème avec la Théorie du Big-Bang ?



Même température \times Apparemment sans lien causal

Fond diffus cosmologique identique (ou presque) dans différentes direction du ciel !

Le rayonnement provient de régions extrêmement éloignées n'ayant pas eu le temps de «communiquer» entre elles selon la théorie standard du Big-Bang : problème de l'horizon)

BANDS!!!

Solution: L'Inflation cosmique !

Phase primordiale d'accélération de l'expansion



Comment réaliser l'inflation ? C'est très simple...

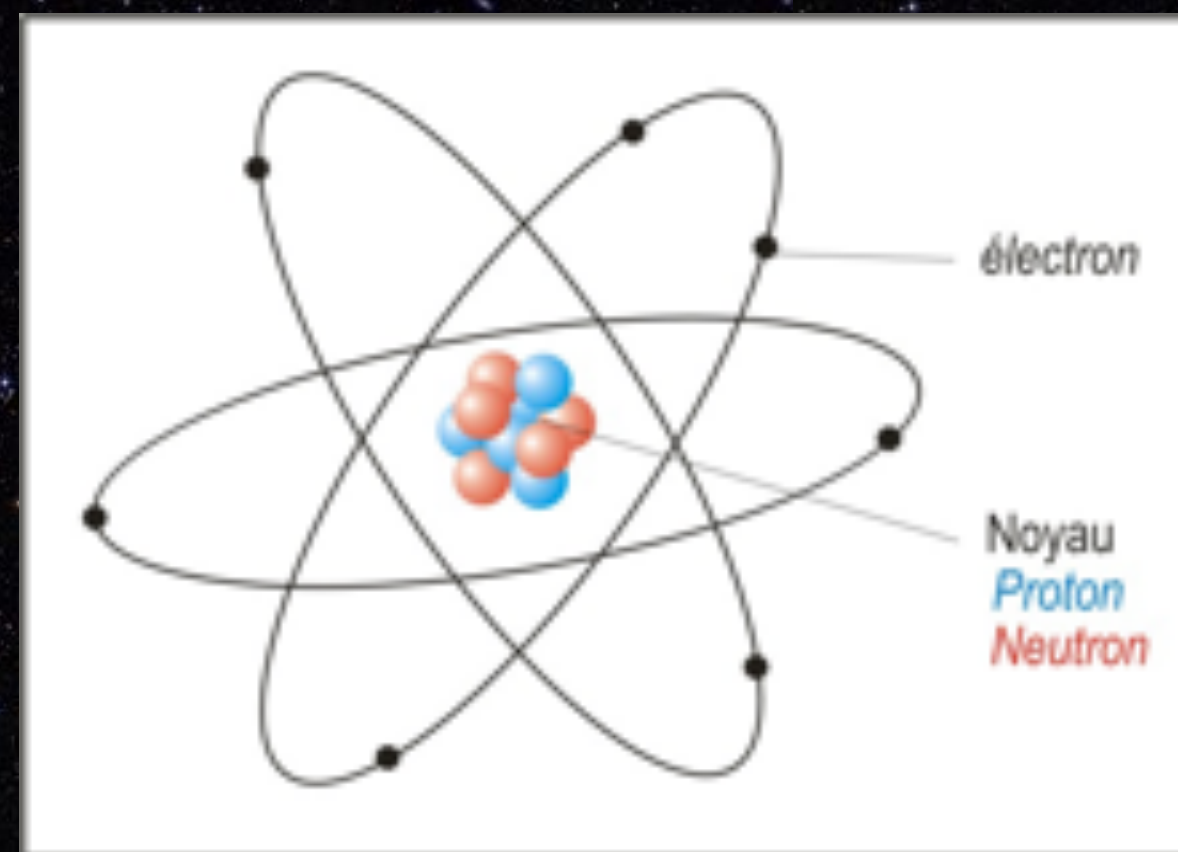
L'Univers était rempli
de manière homogène
par un champ scalaire
évoluant lentement dans le temps !

Notre origine ?

Des fluctuations microscopiques durant l'inflation...

Physique de l'infiniment grand : Relativité Générale d'Einstein

Physique de l'infiniment petit : Mécanique Quantique



La mécanique quantique empêche les électrons de s'écraser sur le noyau atomique

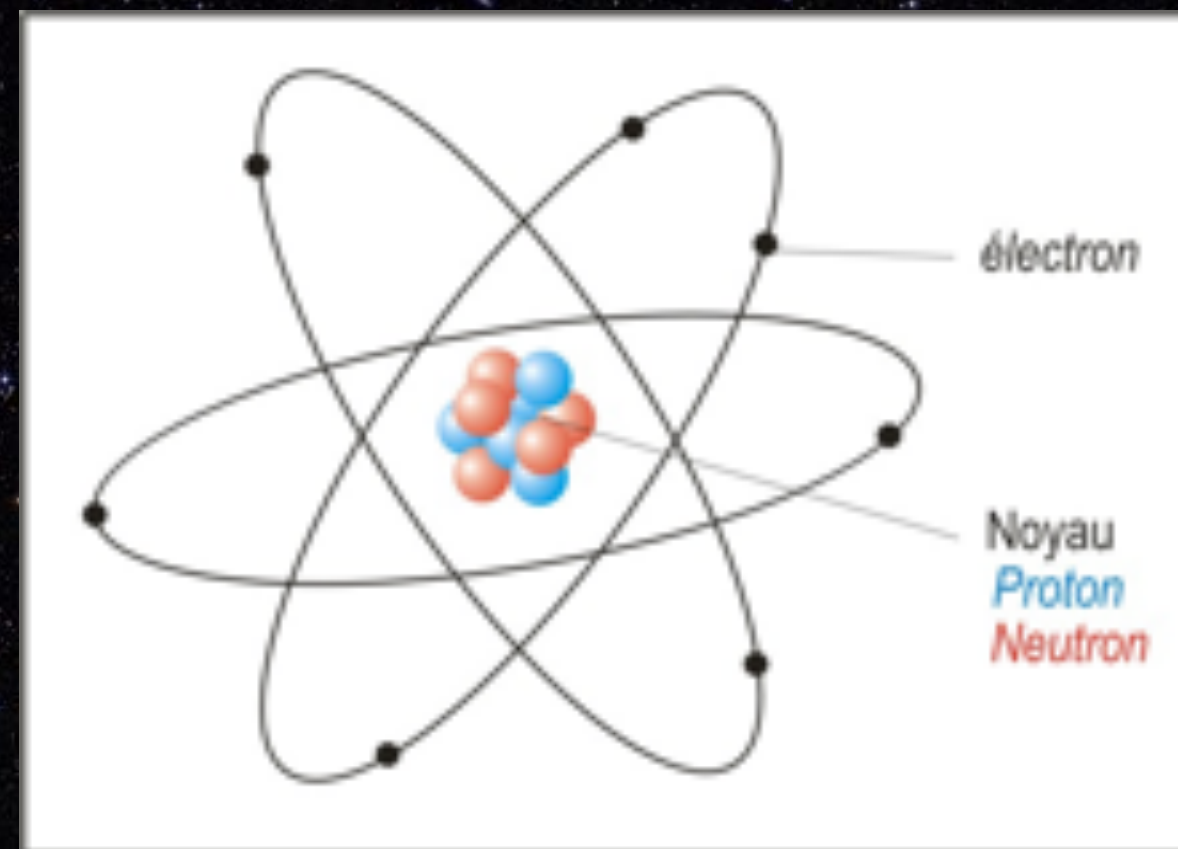
Appliquons la mécanique quantique à l'inflation !

Notre origine ?

Des fluctuations microscopiques durant l'inflation...

Physique de l'infiniment grand : Relativité Générale d'Einstein

Physique de l'infiniment petit : Mécanique Quantique



La mécanique quantique empêche les électrons de s'écraser sur le noyau atomique

Appliquons la mécanique quantique à l'inflation !

Fluctuations quantiques
(microscopiques)



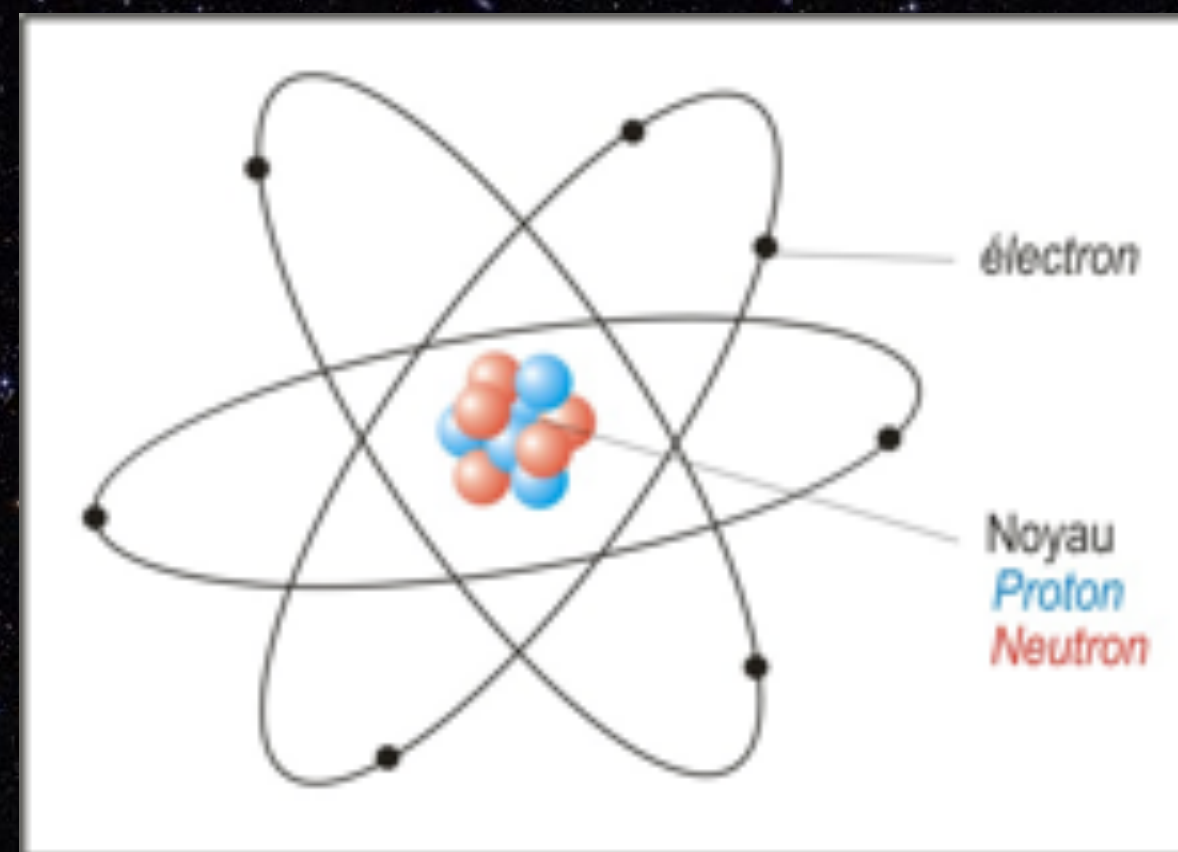
Inhomogénéités
macroscopiques

Notre origine ?

Des fluctuations microscopiques durant l'inflation...

Physique de l'infiniment grand : Relativité Générale d'Einstein

Physique de l'infiniment petit : Mécanique Quantique



La mécanique quantique empêche les électrons de s'écraser sur le noyau atomique

Appliquons la mécanique quantique à l'inflation !

Fluctuations quantiques
(microscopiques)

Inflation

Inhomogénéités
macroscopiques

Ce mécanisme naturel rend compte parfaitement
des observations du CMB et
de la distribution des grandes structures de l'Univers !

Prochaine étape: quel est le bon modèle d'inflation ?



La Nuit étoilée
par Vincent Van Gogh

Pour en savoir plus
OEUVRES-ART.COM



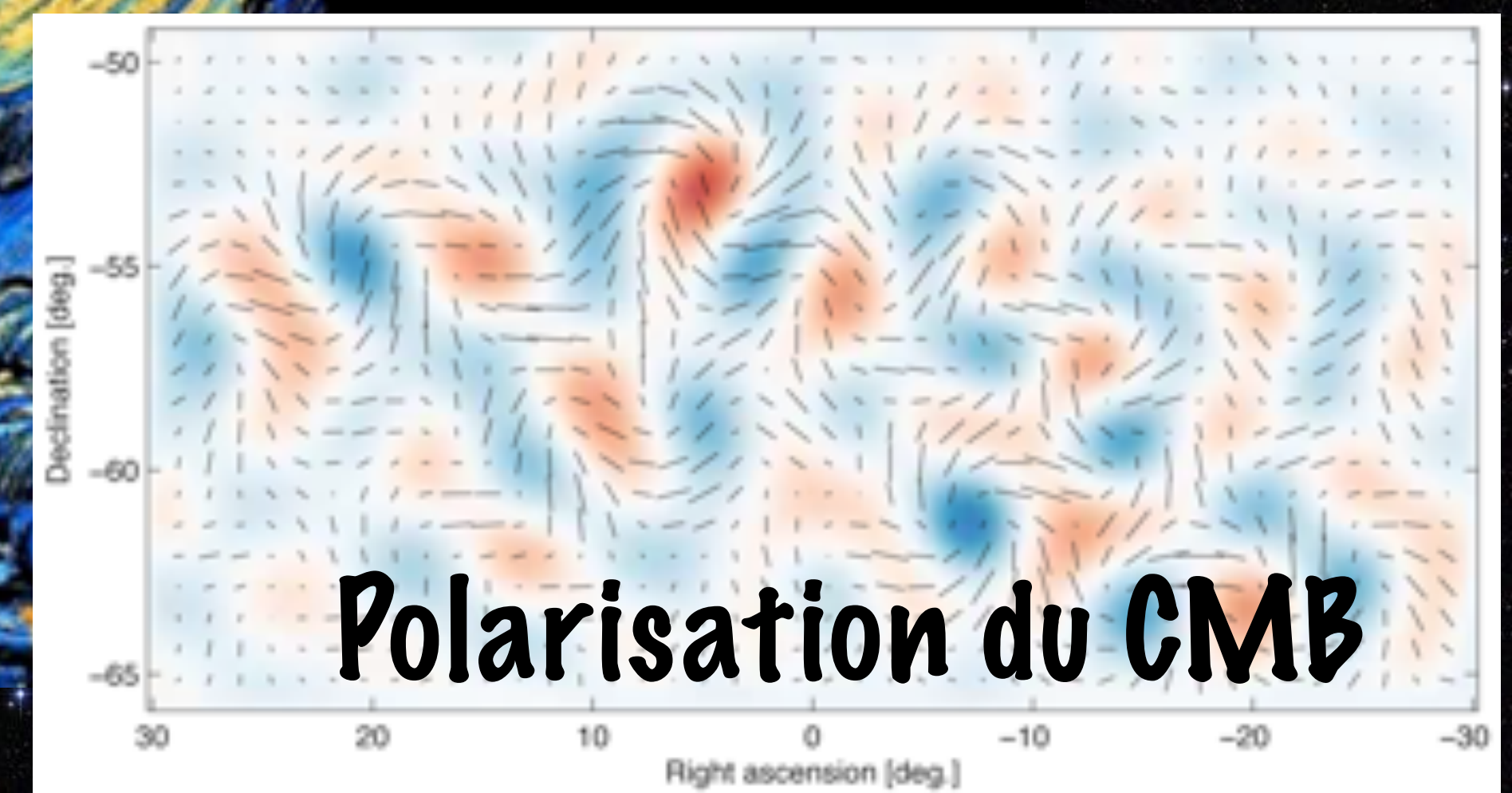
Prochaine étape: quel est le bon modèle d'inflation ?



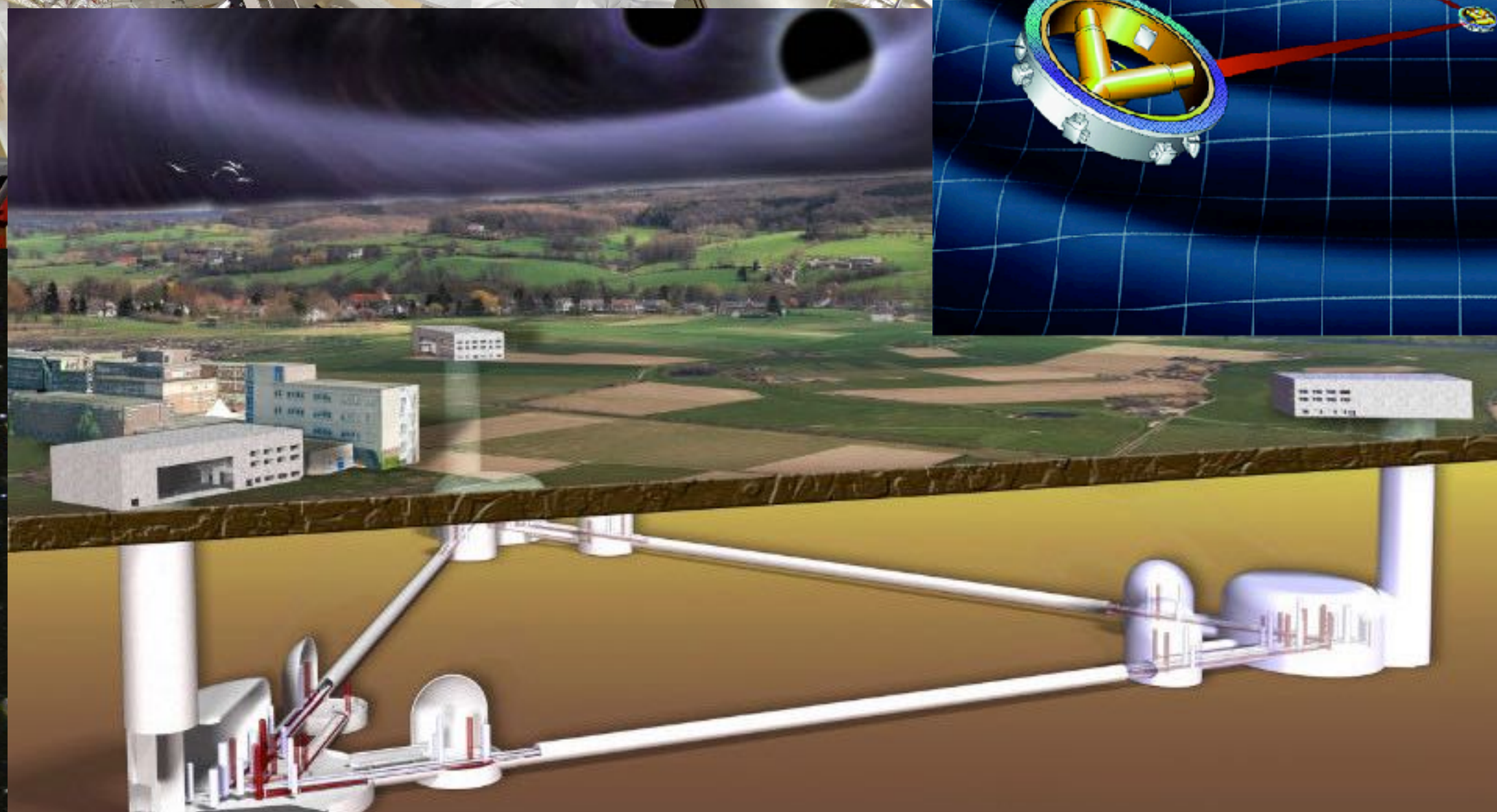
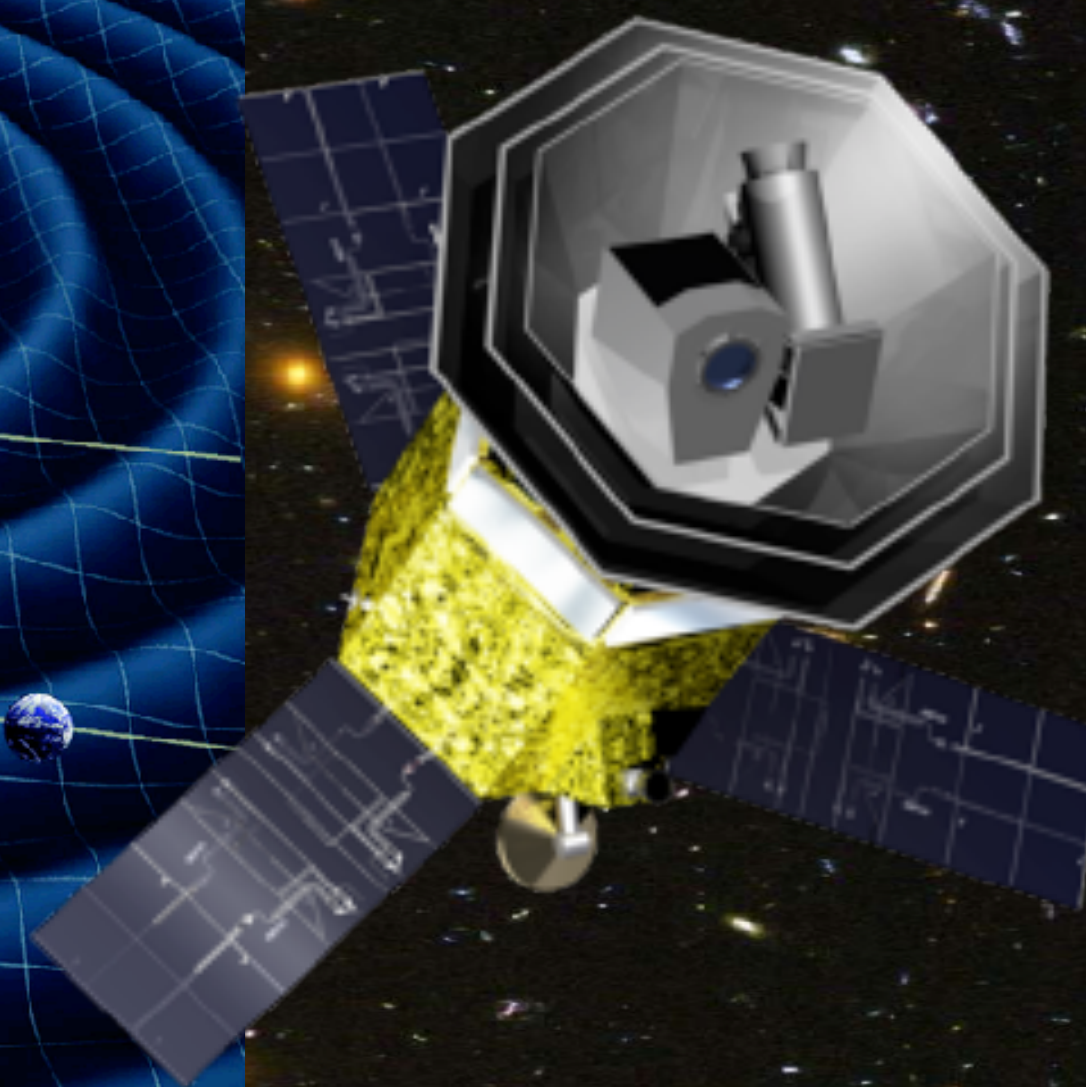
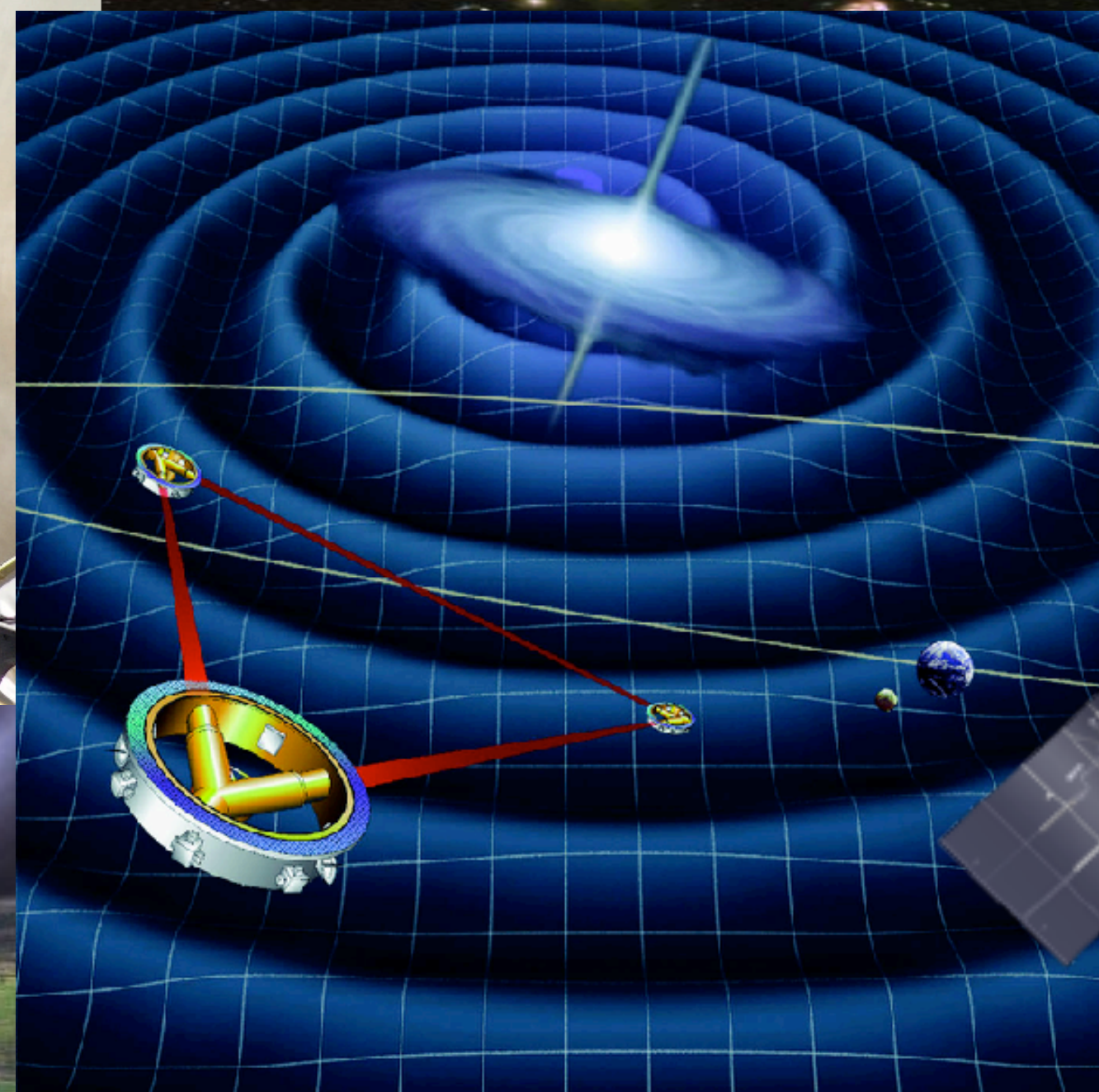
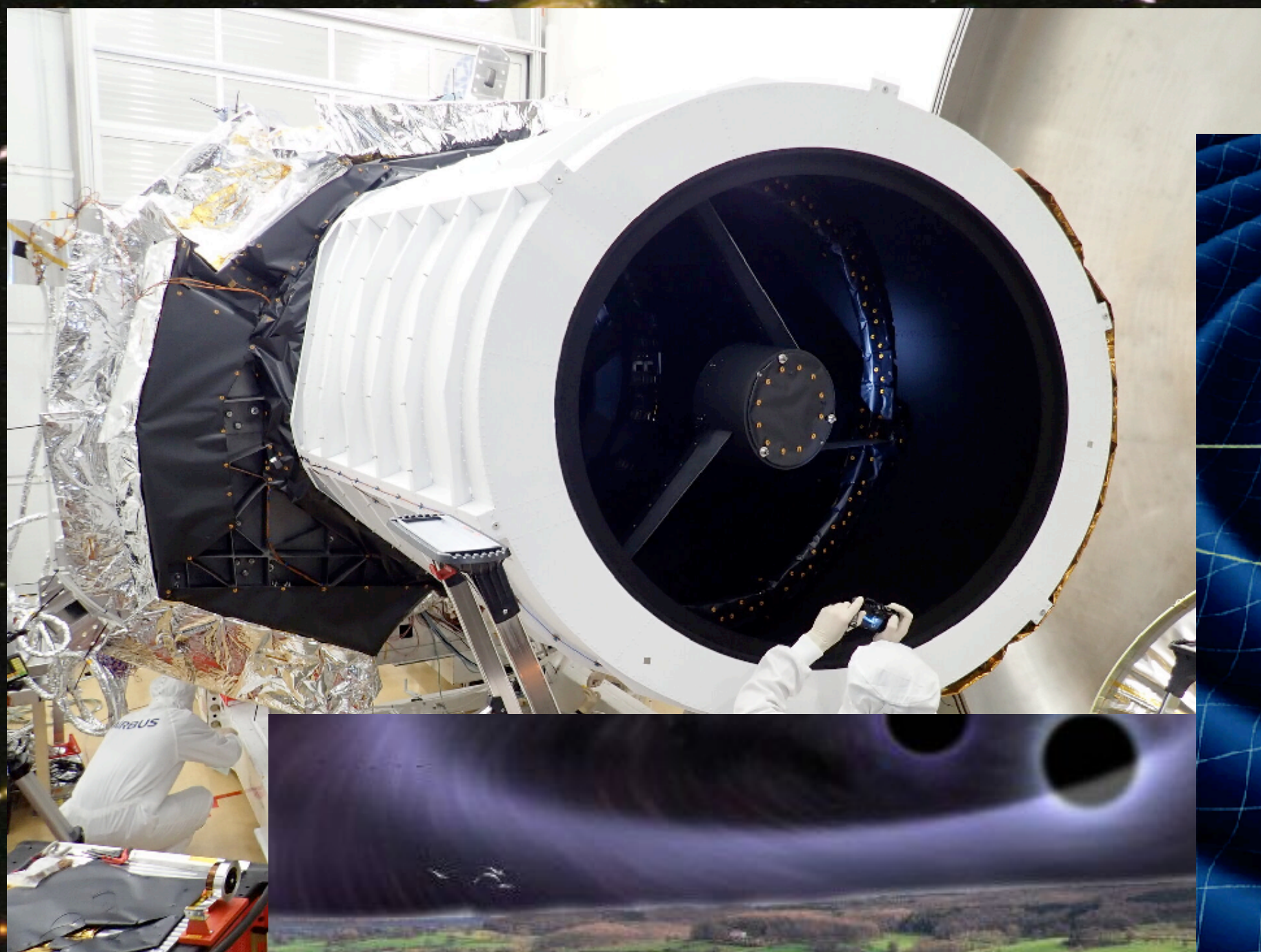
mission spatiale LiteBird



La Nuit étoilée
par Vincent Van Gogh



Conclusion - A vous de jouer...



«L'essentiel est invisible...»
Antoine de Saint-Exupéry