

Cosmologie et modèle du Big-Bang



Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2011

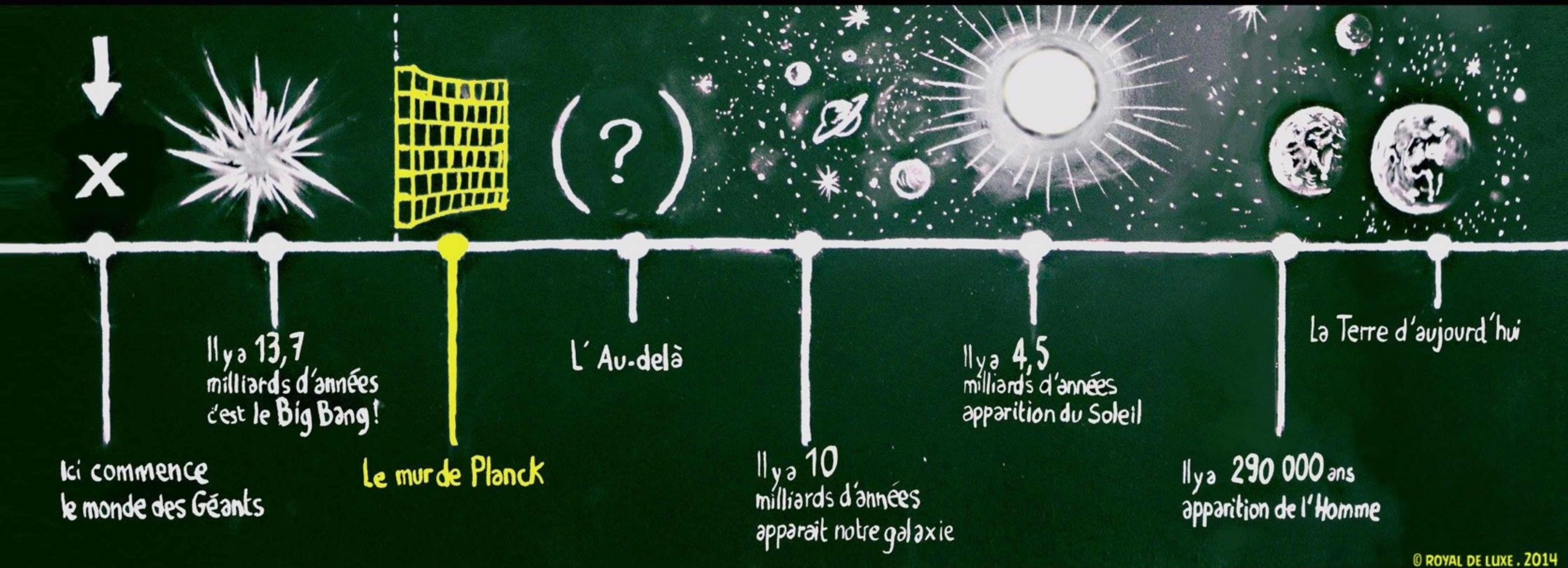
THE ACCELERATING UNIVERSE

Les artistes

juin 2014



Les artistes



Les charlatans

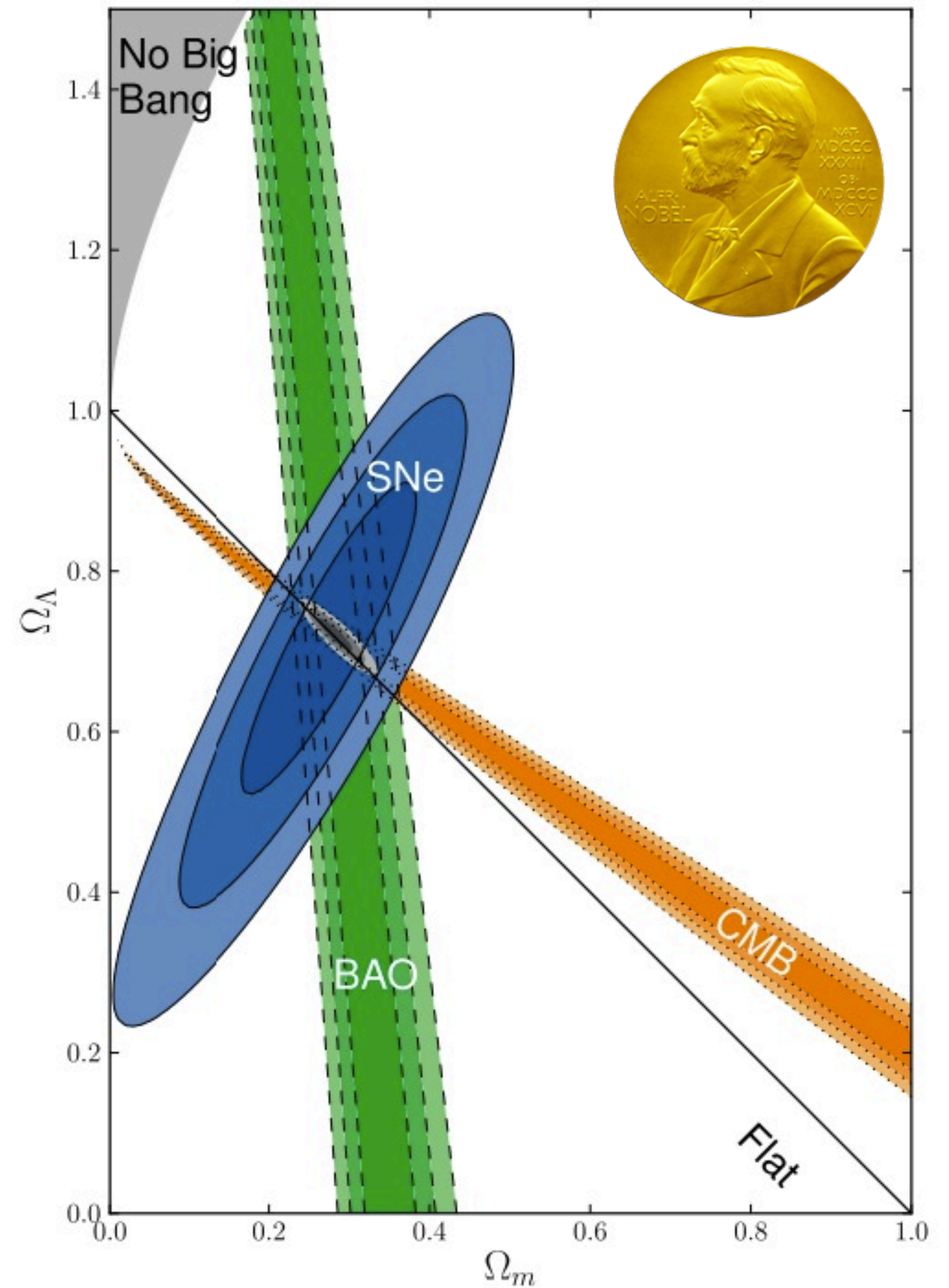
Le 25 Mai 2014

- de 9h30 à 13h30: Atelier «Alchimie cellulaire: Libération des verrous originels et reconnexion aux origines galactiques»

Tarif: 60 euros

Les scientifiques

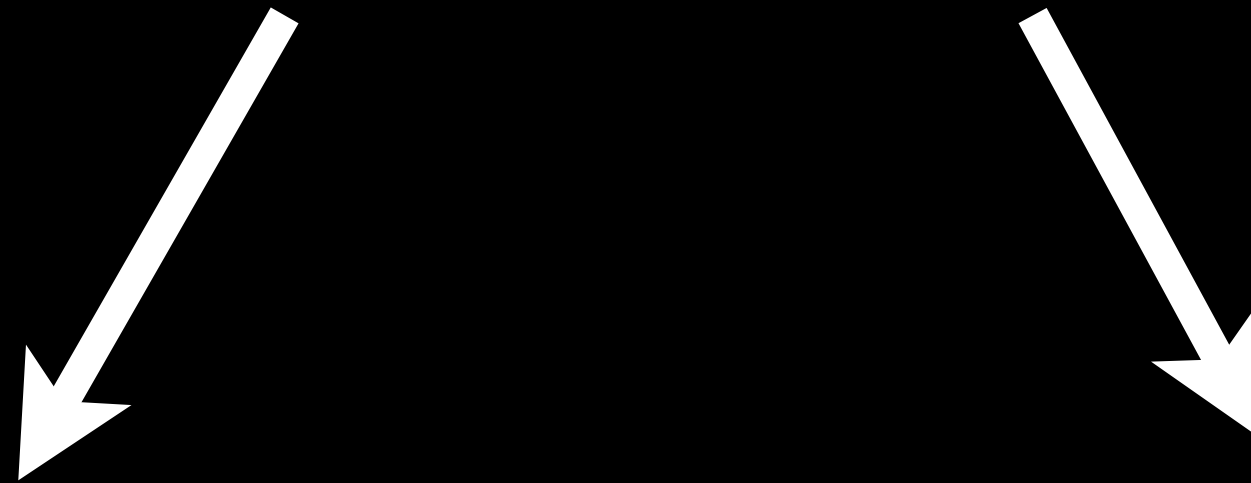
$$\Omega_{\kappa} = \Omega_m + \Omega_{\Lambda} - 1$$



Précision lexicale (Le Petit Robert 2011)

Astronomie

“Science étudiant les mouvements, la structure et l'évolution des corps célestes.”



Astrophysique

“Branche de l'astronomie qui étudie la nature physique, la formation et l'évolution des corps célestes.”

Cosmologie

“Théorie (philosophique ou scientifique) de la formation et de la nature de l'univers.”

Plan

Des observations à la modélisation
Gravitation et principe cosmologique
Quelques propriétés d'un univers en expansion
~~Supernovae~~, (nucléosynthèse) et rayonnement fossile

Quelques dimensions dans l'Univers

1 al = 10 000 milliards de km



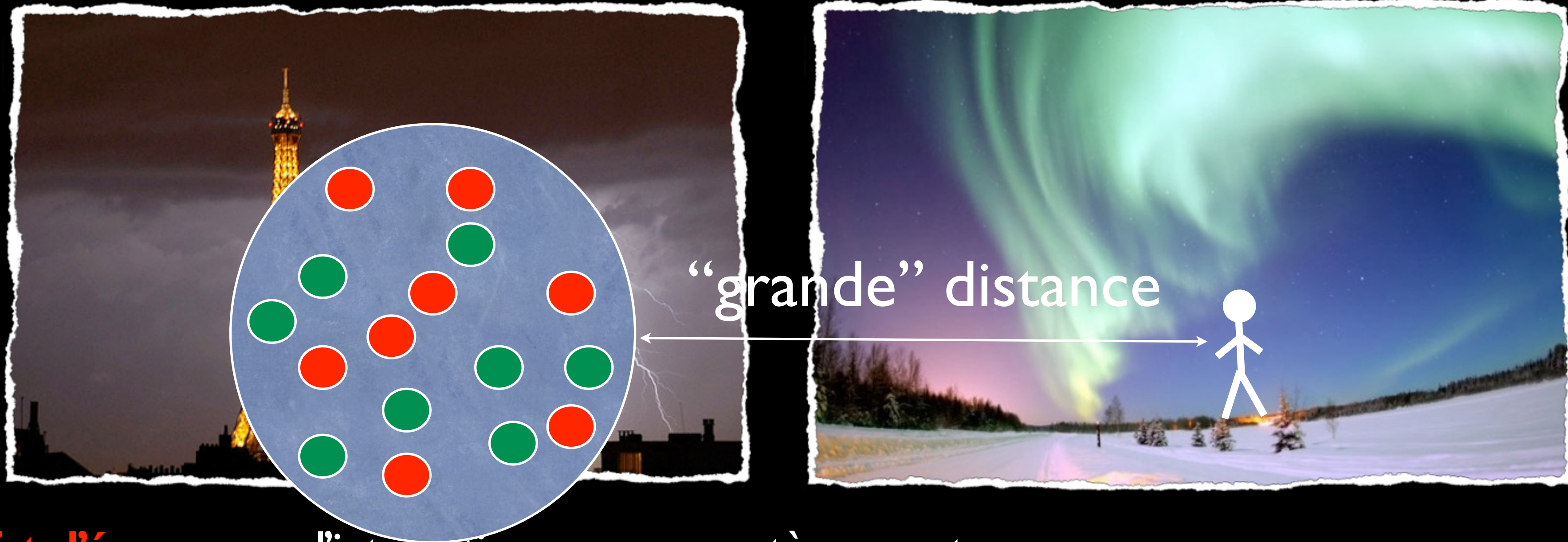
Systeme solaire : quelques heures-lumière

Galaxie : 100 000 années-lumière

Les forces dans la nature (I)

la plus connue : la force électromagnétique (1860)

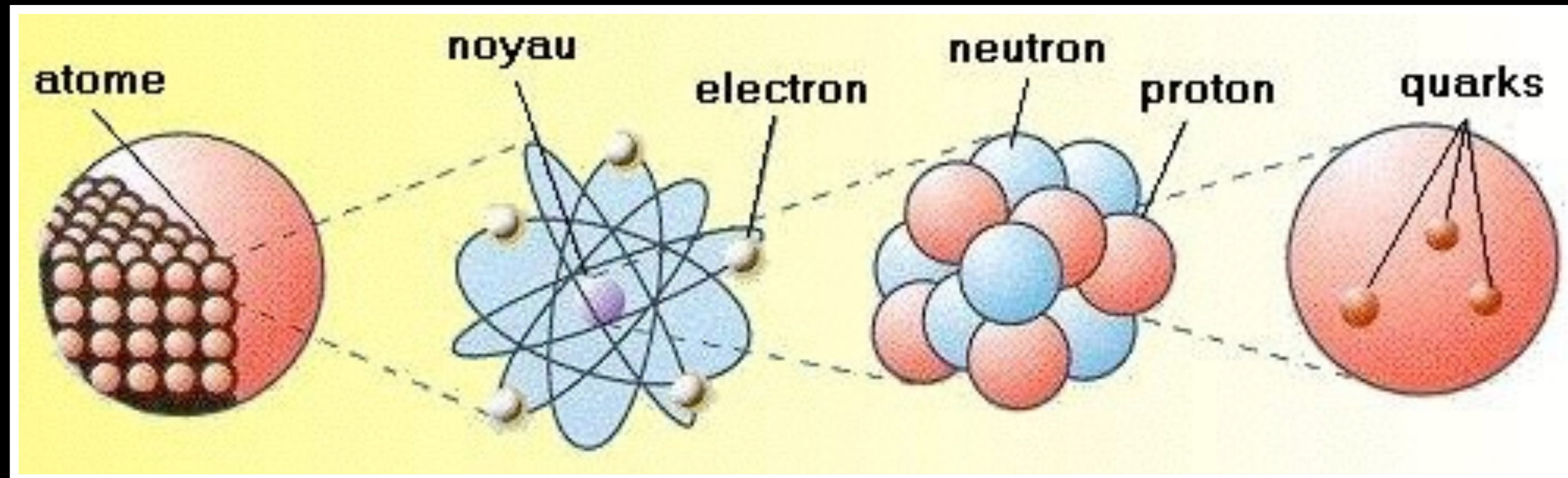
- cohésion des atomes et molécules, biologie, lumière, téléphone...
- de **portée infinie**
- **répulsive** (++, --) **attractive** (+-)
- l'intensité dépend de la **valeur** des charges électriques



- **effet d'écran** : pas d'interaction pour un système neutre

Les forces dans la nature (2)

la force nucléaire forte (1960)



- cohésion des noyaux ! (sinon instables)
- entre les quarks dans un noyau atomique (proton, neutron...)
- de **très courte portée mais intense** (1 000 fois plus forte que la force électromagnétique)
- toujours **attractive**
- concerne les objets qui ont une charge de **couleur**

Les forces dans la nature (3)

la force nucléaire faible (1933-1960)

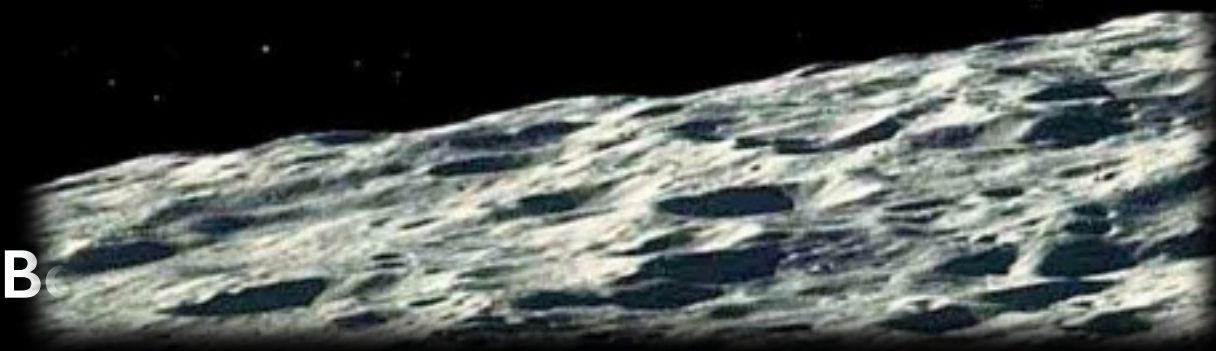
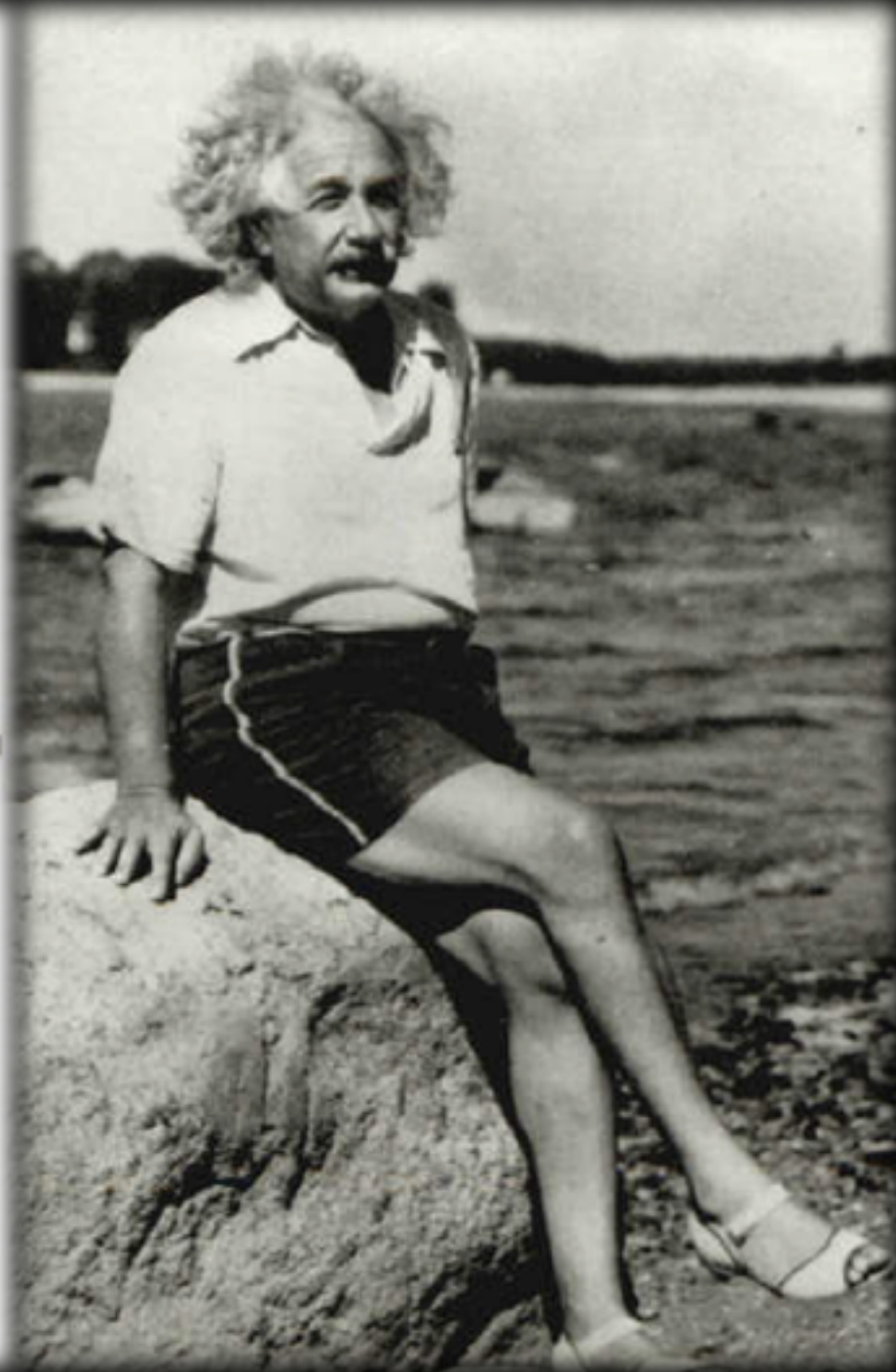
- agit sur les quarks et les leptons (famille des fermions) **très courte portée** et **peu intense**
- permet l'échange de masse, d'énergie et de couleur
- responsable de la **radioactivité β** : carbone 14, potassium 40 du corps (5 000 / s), lumière des étoiles...
- soleil : 1 00 000 000 000 000 000 neutrinos par seconde !



Les forces dans la nature (4)

la force gravitationnelle (1687 puis 1915)

- c'est la force de **plus petite intensité** (10^{-40} fois plus faible que l'interaction forte !)
- sa portée est **infinie**
- force **uniquement attractive**, contrairement à la force électrique : **pas de phénomène d'écrantage**
- l'intensité de la force ressentie par un objet dépend de sa **masse**, de celles des corps qui créent le champ gravitationnel ainsi que de la distance qui les sépare



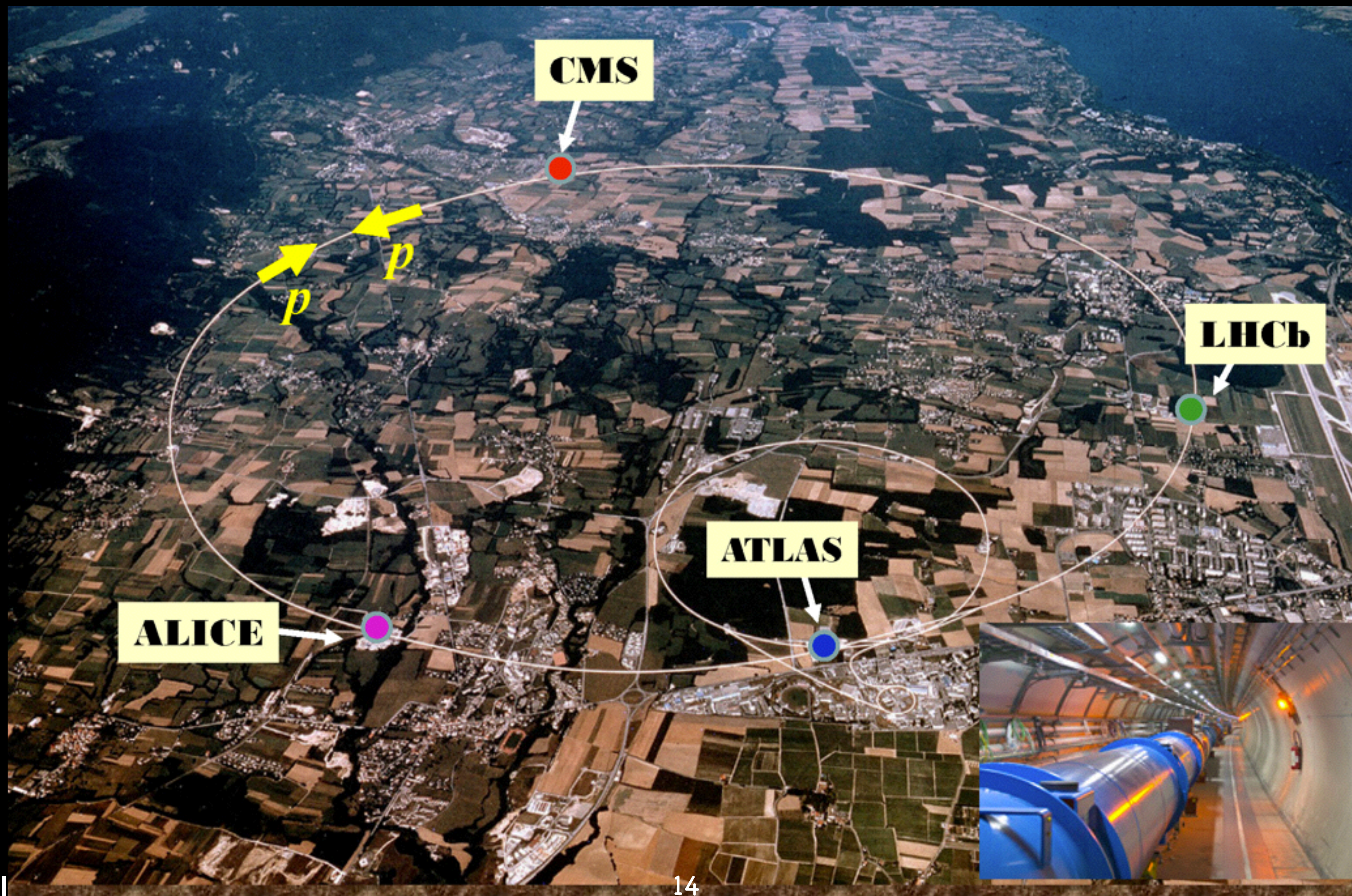
Les forces dans la nature

résumé

interaction	forte	électro-magnétique	faible	gravitation
intensité relative	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-40}
portée (m)	10^{-15}	∞	10^{-18}	∞

Les forces dans la nature (parenthèse)

en mécanique quantique, les forces de la nature sont véhiculées par des médiateurs, appelés **bosons**



Les forces dans la nature

résumé

interaction	forte	électro-magnétique	faible	gravitation
intensité relative	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-40}
portée (m)	10^{-15}	∞	10^{-18}	∞
médiateur	gluon	photon	W^+, W^-, Z^0	graviton

Les forces dans la nature

résumé

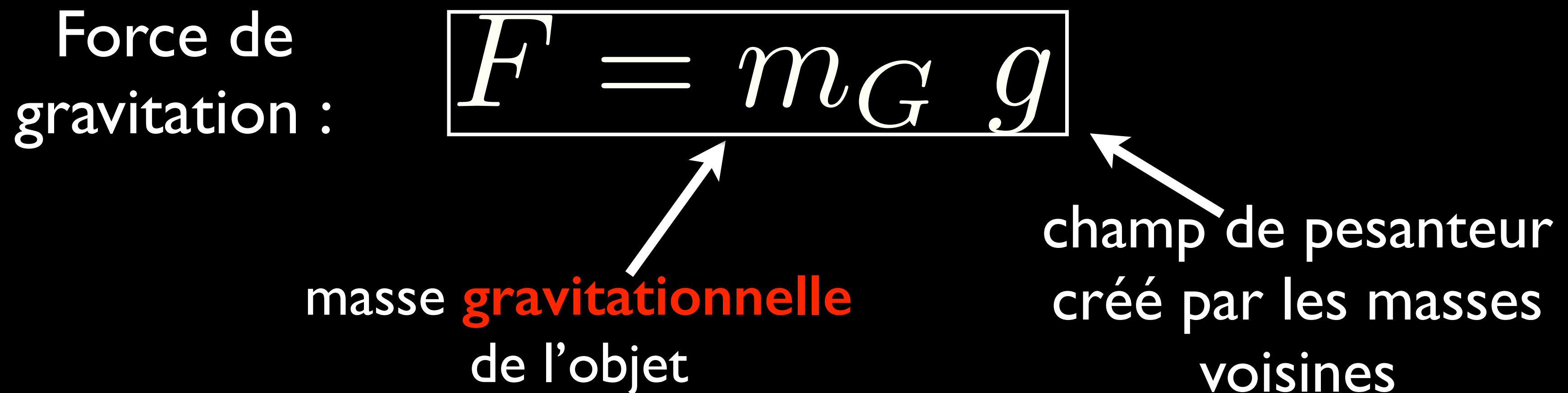
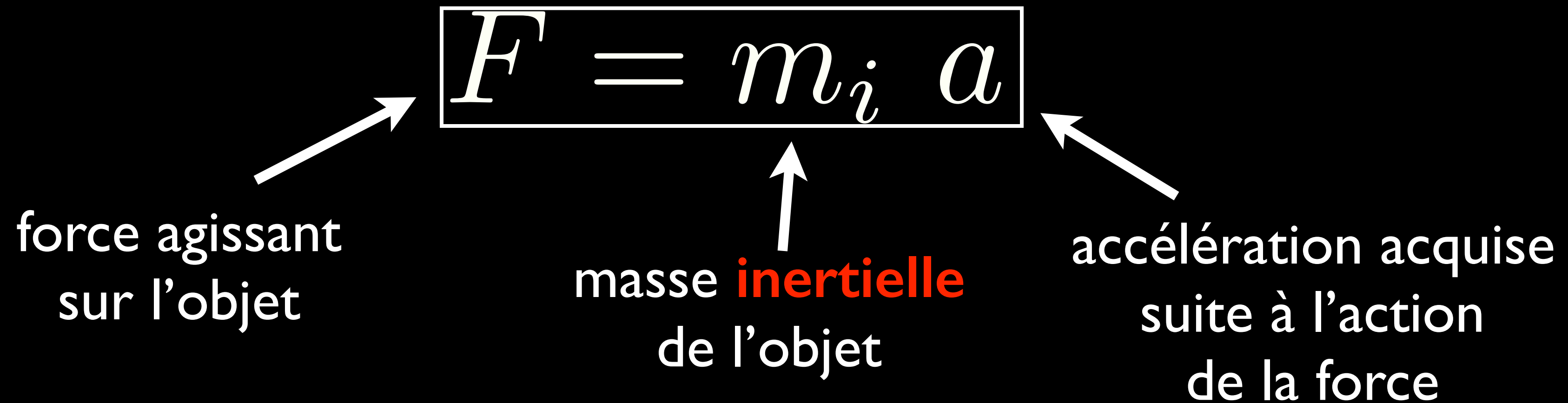
interaction	forte	électro- magnétique	faible	gravitation
intensité relative	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-40}
portée (m)	10^{-15}	écran	10^{-18}	∞
médiateur	gluon 1979	photon 1923	W^+ , W^- , Z^0 1983	graviton

cosmologie = théorie de la gravitation

à découvrir !

Cas particulier de la gravitation

Loi de Newton (XVII^{ème} siècle) :



Cas particulier de la gravitation

On obtient donc :

$$m_G g = m_i a$$

or $m_G = m_i$

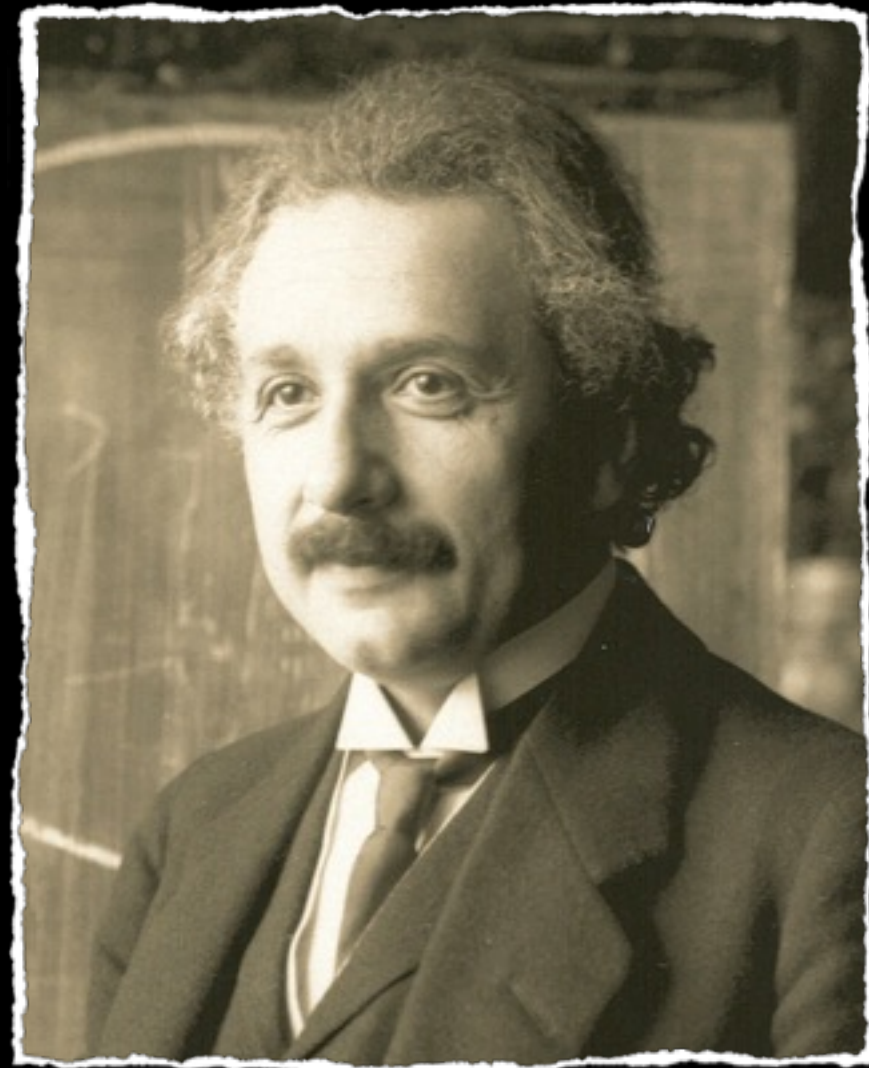
c'est le principe d'équivalence

$$g = a$$

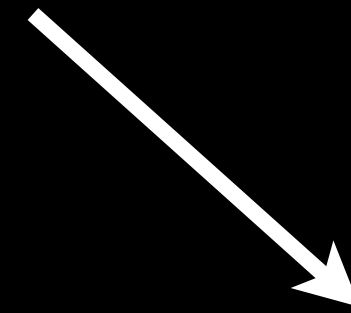
Les conséquences sont ÉNORMES !

L'accélération d'un objet dans un champ de pesanteur ne dépend pas de sa masse ni de sa nature !

Cas particulier de la gravitation



$$g = a$$



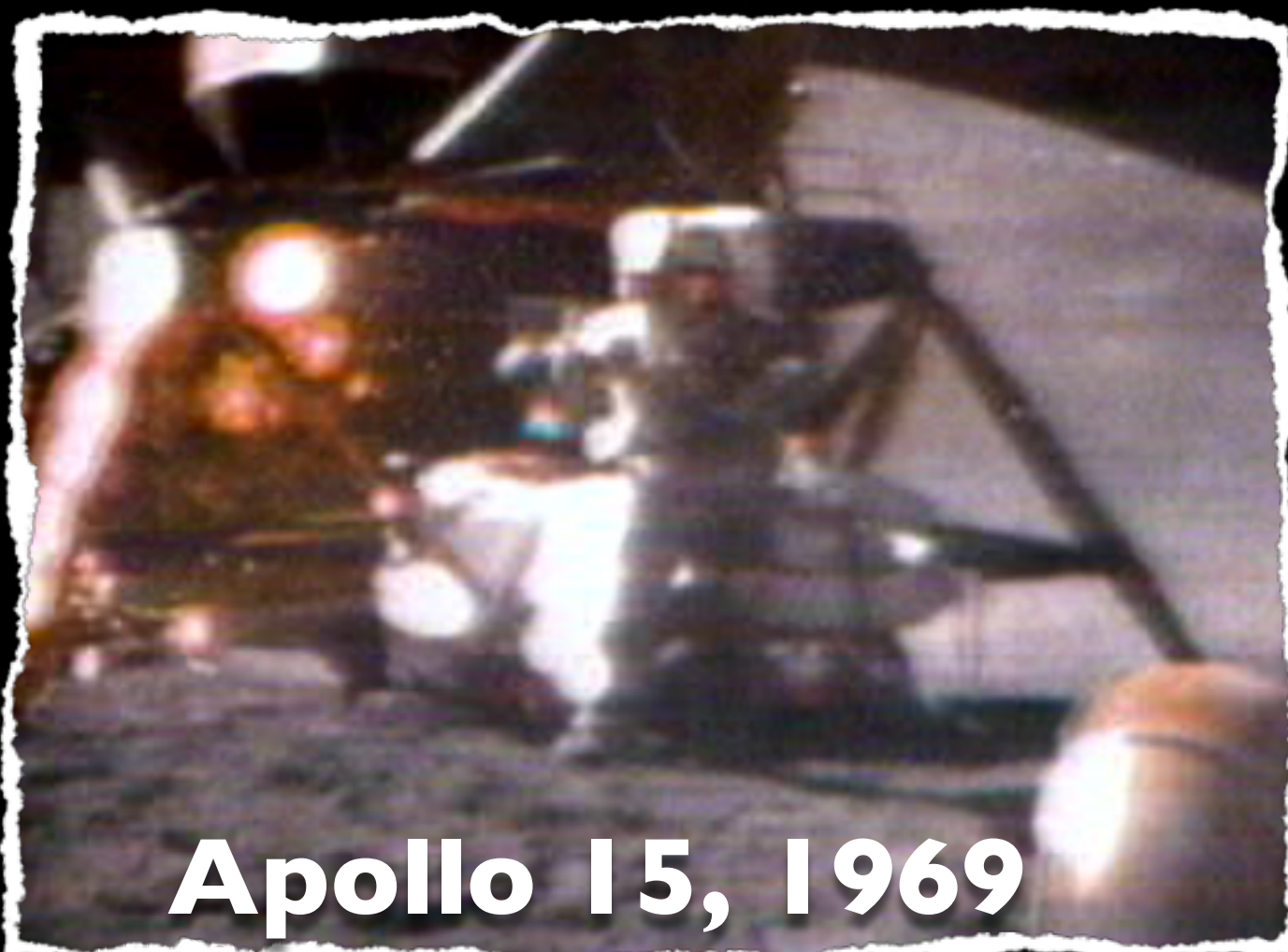
La gravitation **disparaît** par un choix de repère approprié “en chute libre”

+

relativité restreinte (1905)

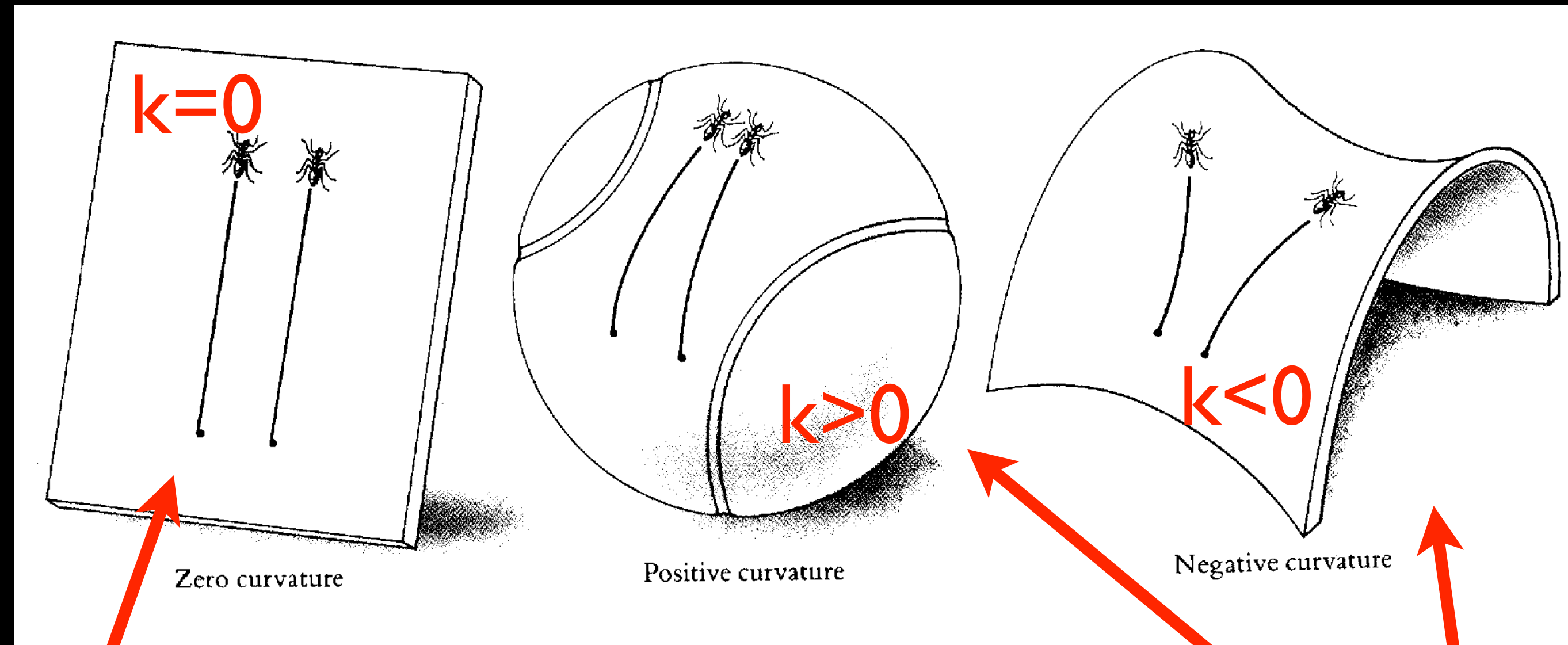
=

relativité générale (1915)



Apollo 15, 1969

Courbure



géométrie
euclidienne

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Pythagore

géométrie
non euclidienne

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

avec en plus la dimension imbriquée du temps...

Équations d'Einstein

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

courbure de
l'espace-temps

=

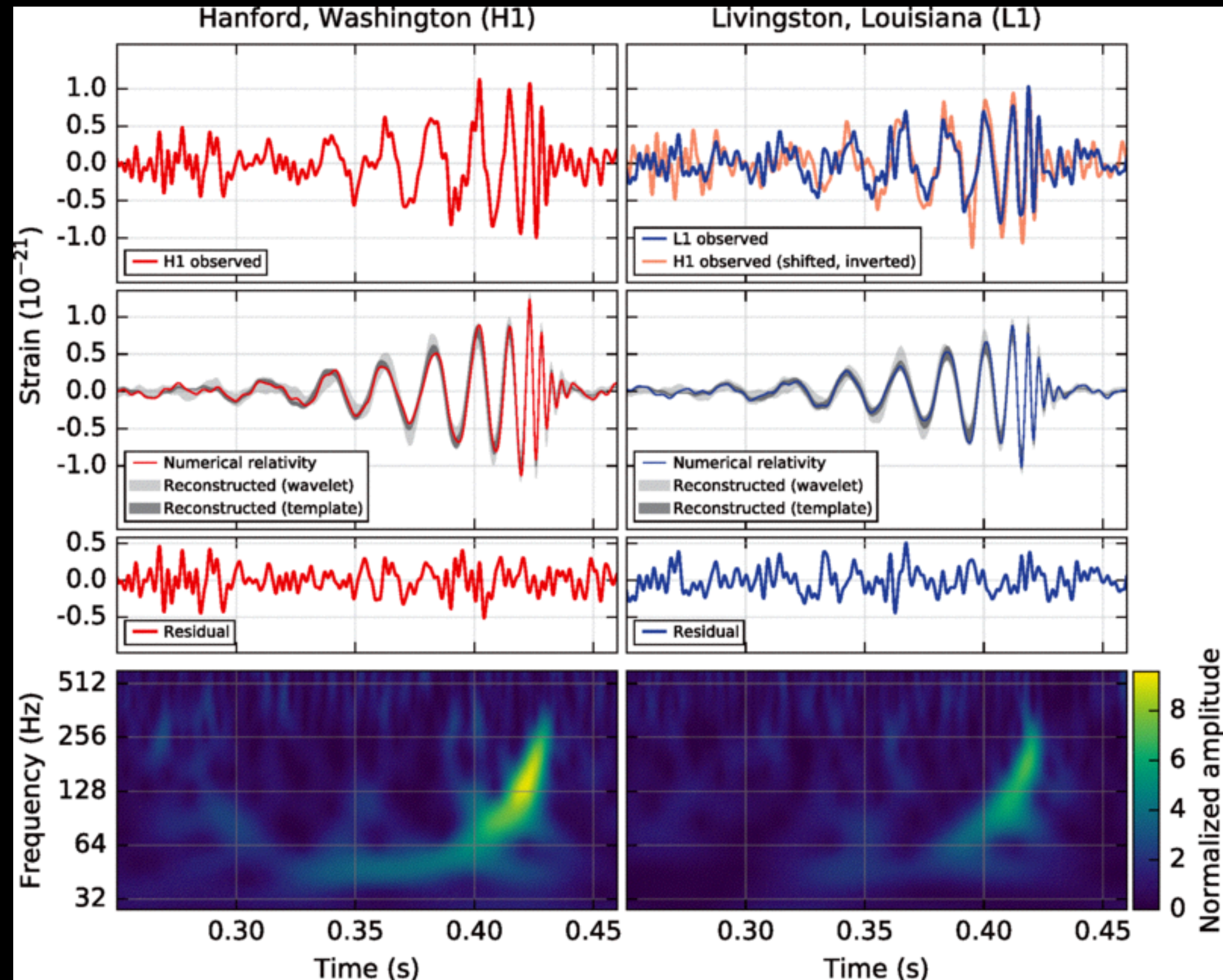
énergie et
matière

+

constante
cosmologique



Découverte des ondes gravitationnelles ! (février 2016)



Pour aller plus loin : le principe cosmologique

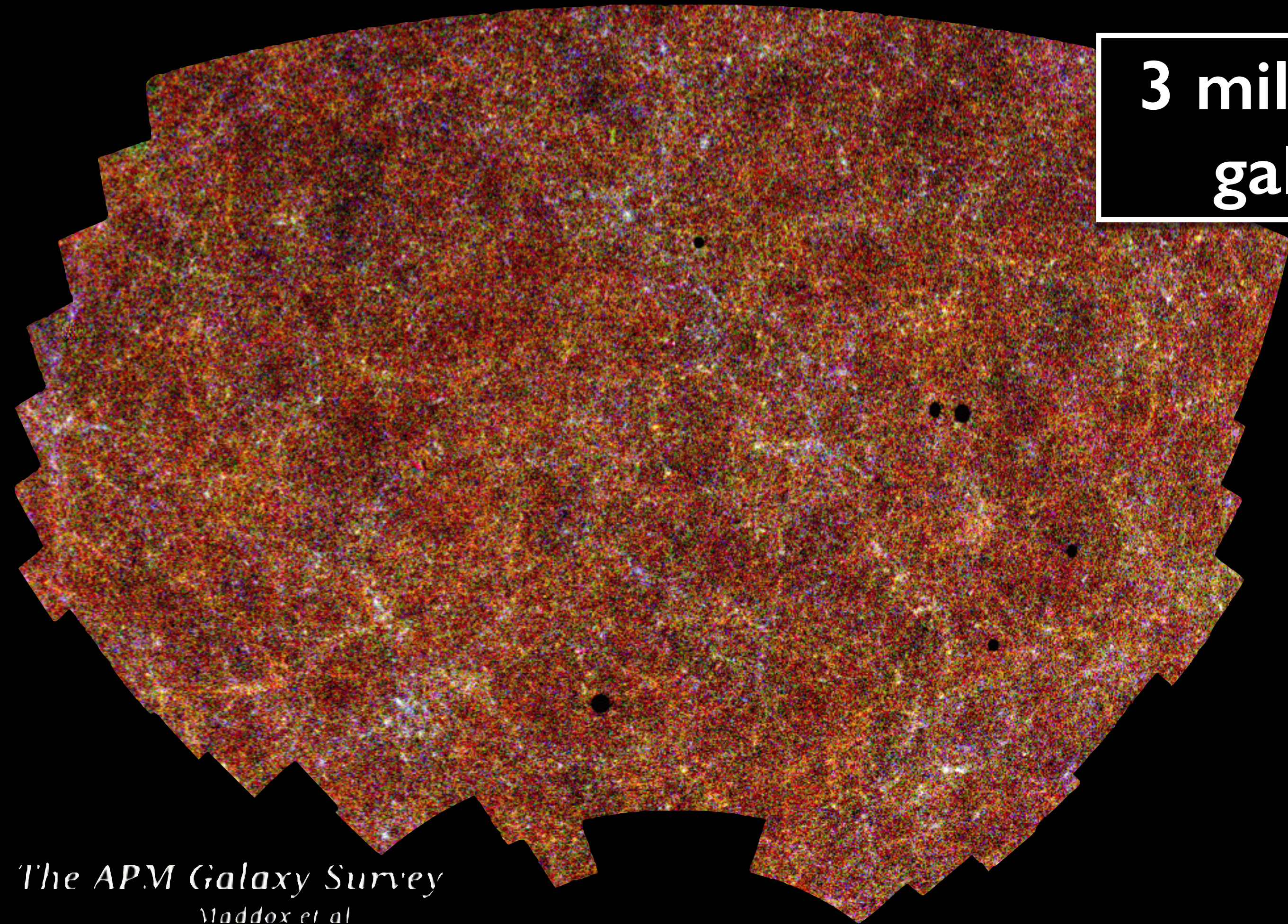


Copernic : la Terre n'est pas au centre du système solaire

Par extension le **principe copernicien** stipule qu'il n'y a aucun point privilégié dans l'univers (donc pas de centre)

Aujourd'hui c'est le **principe cosmologique** qui est appliqué : il englobe le principe copernicien et stipule en plus que **l'univers est homogène et isotrope.**

Homogénéité et isotropie



3 millions de galaxies

The APM Galaxy Survey
Maddox et al

l'univers est homogène et isotrope **en moyenne**



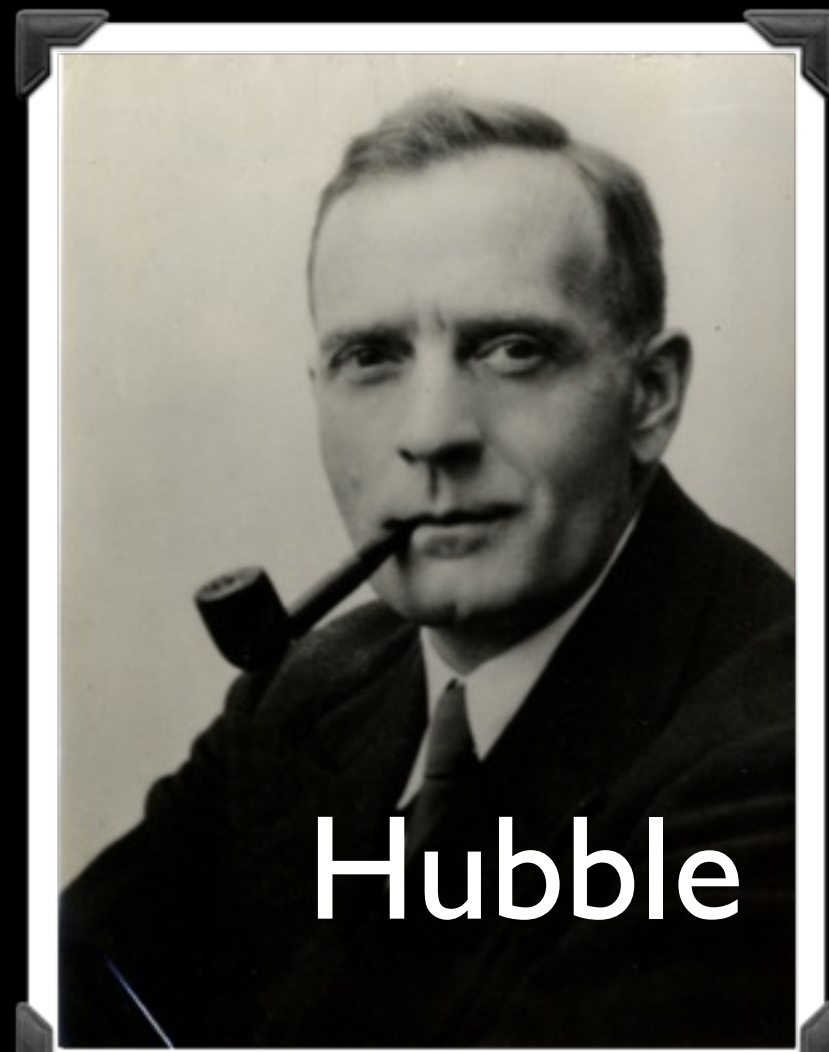
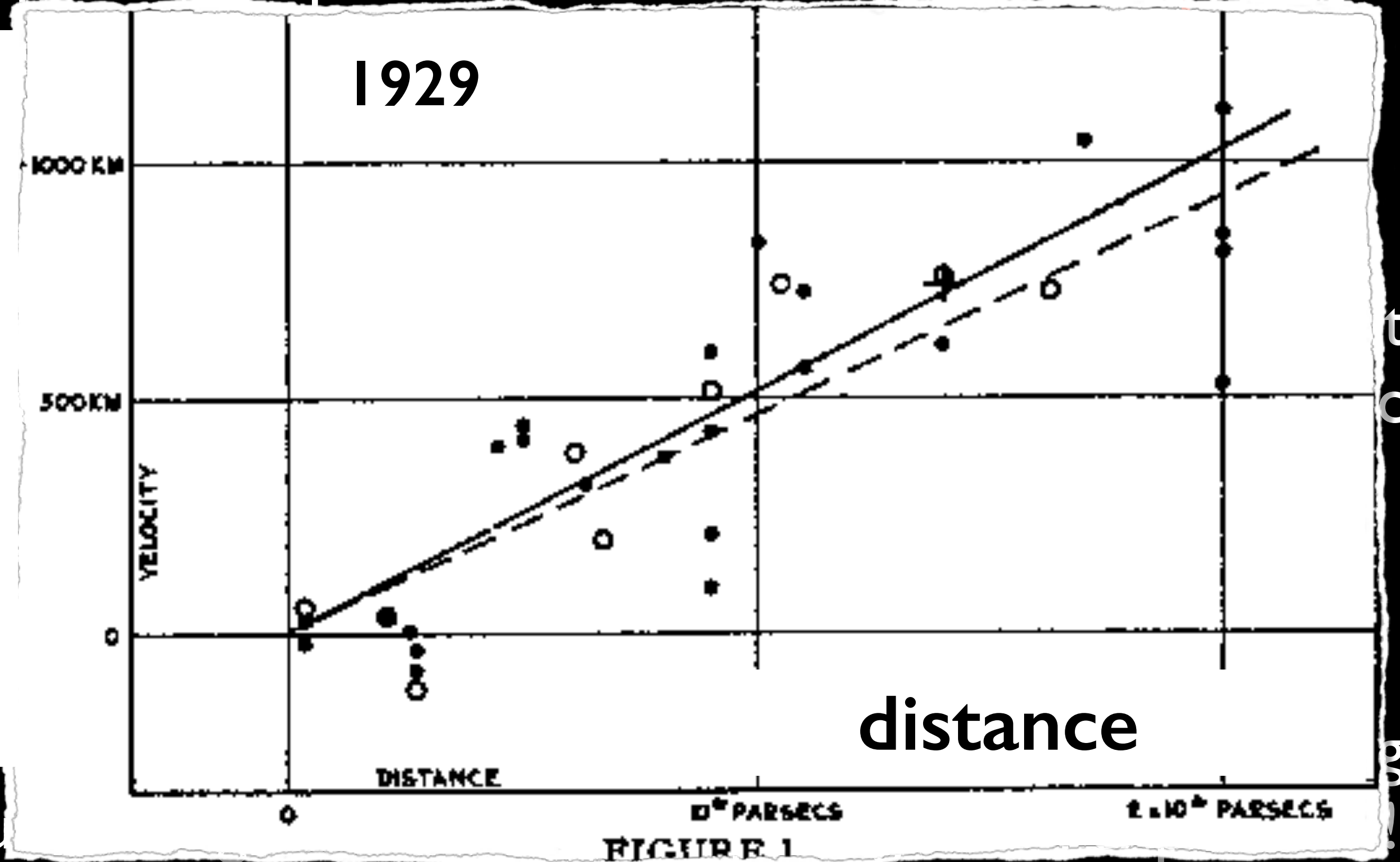
Expansion

1927 : l'abbé Georges Lemaître trouve des solutions dynamiques aux équations d'Einstein : il prédit l'**expansion** de l'Un

1929
des
l'exp

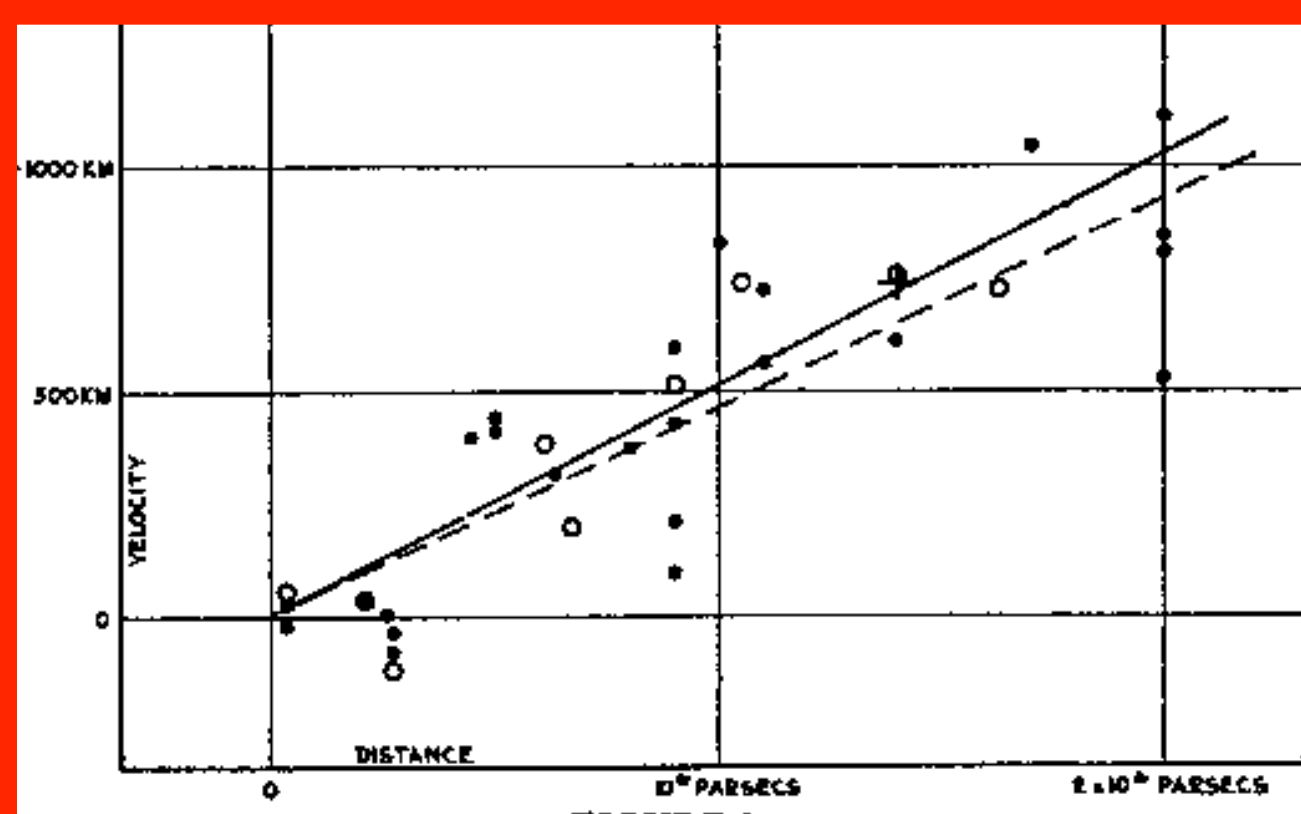
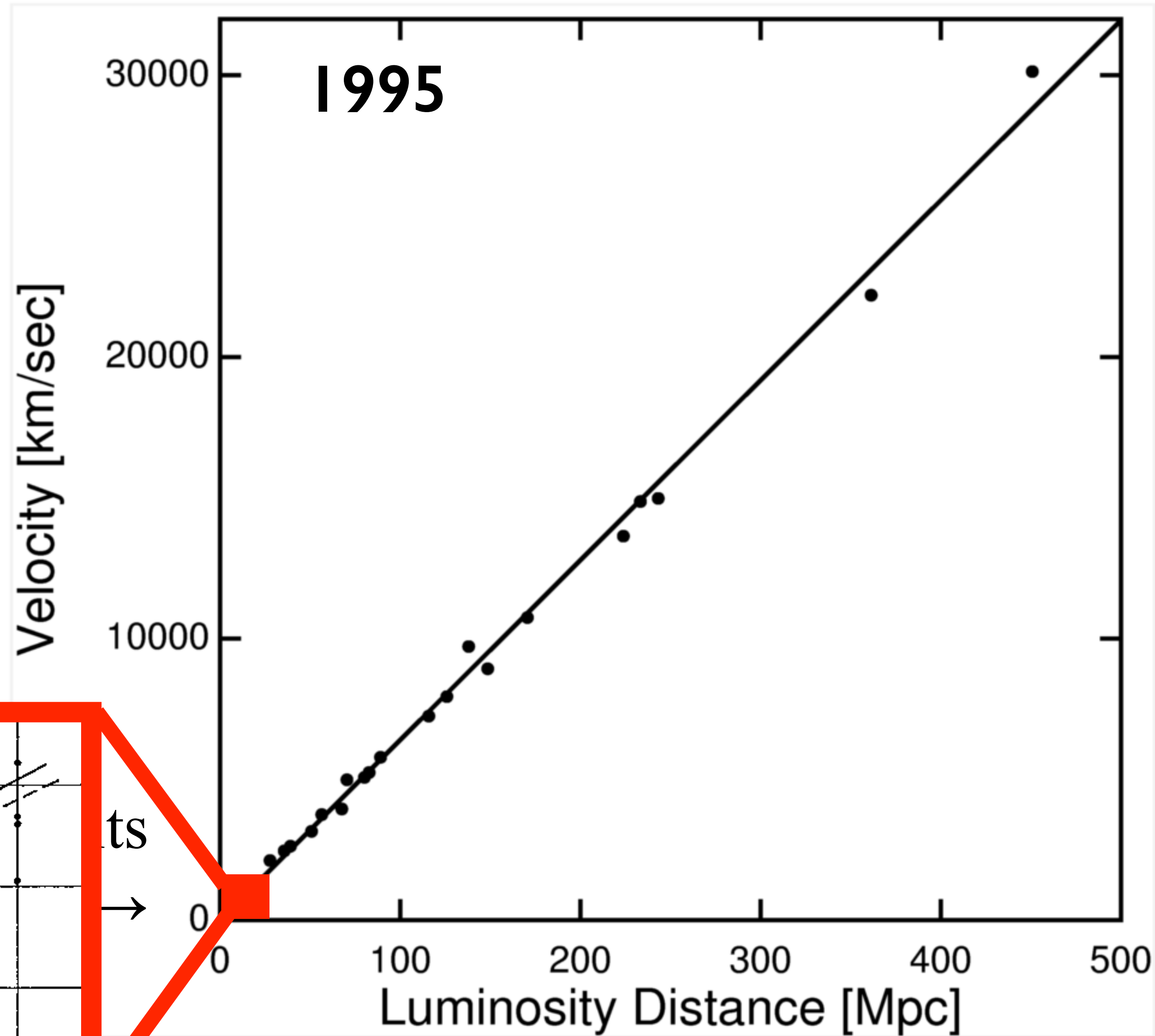
vitesse de fuite

l'art
le tradu



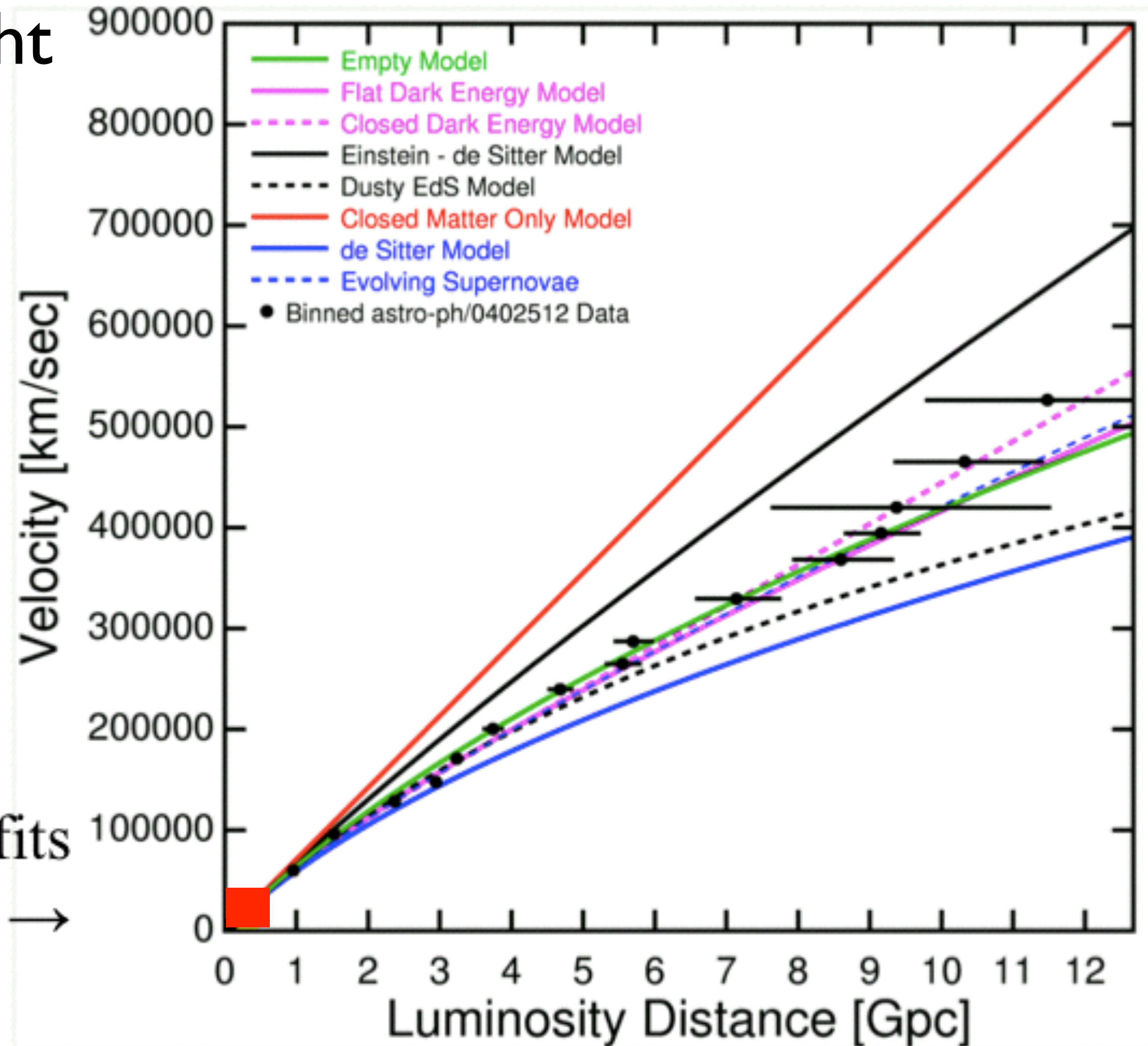
te
c
gton

Expansion



Expansion

Ned Wright
2004



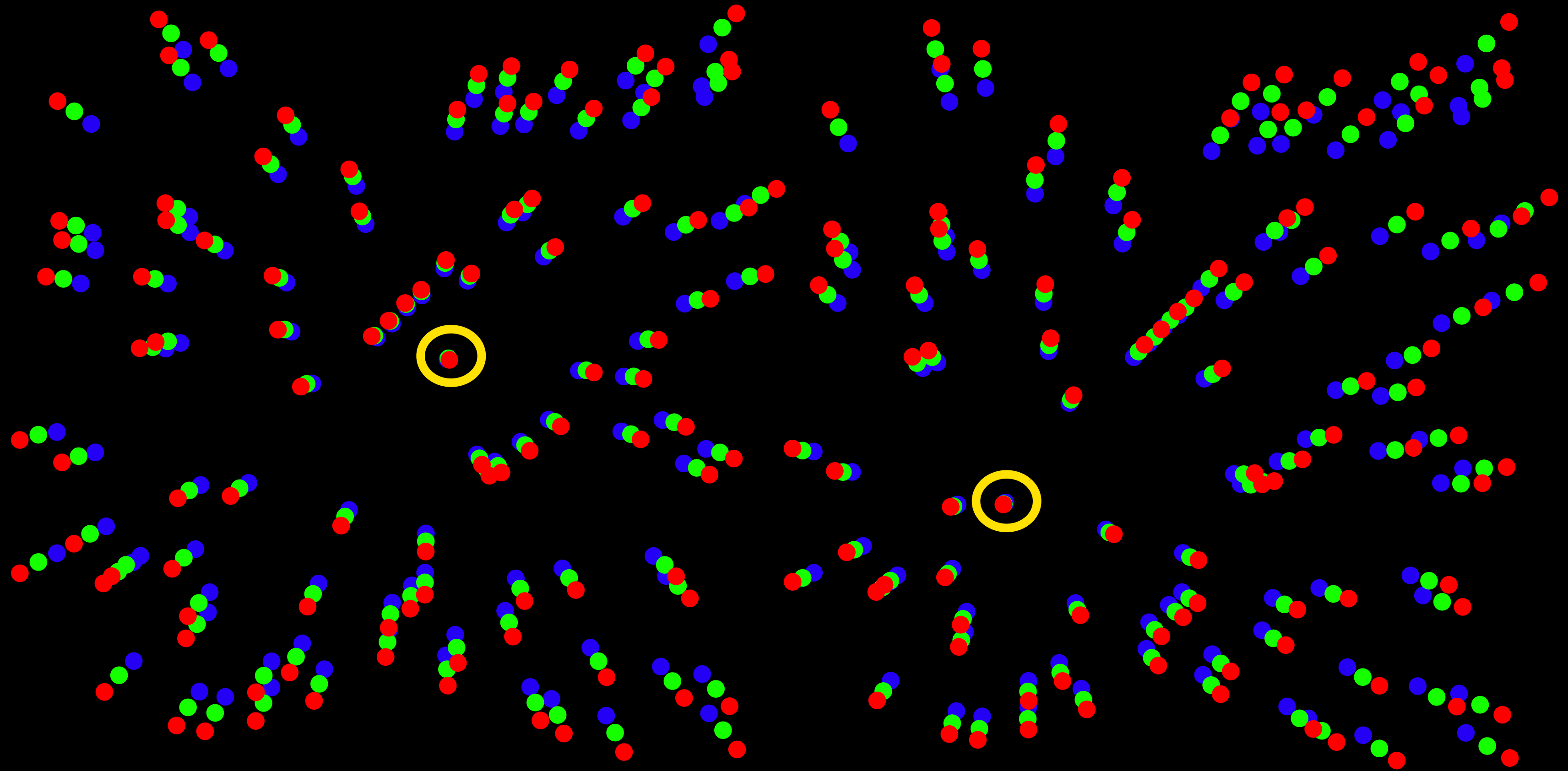
1995 data fits
in here →

$$v = cz$$

On peut éliminer
des modèles !

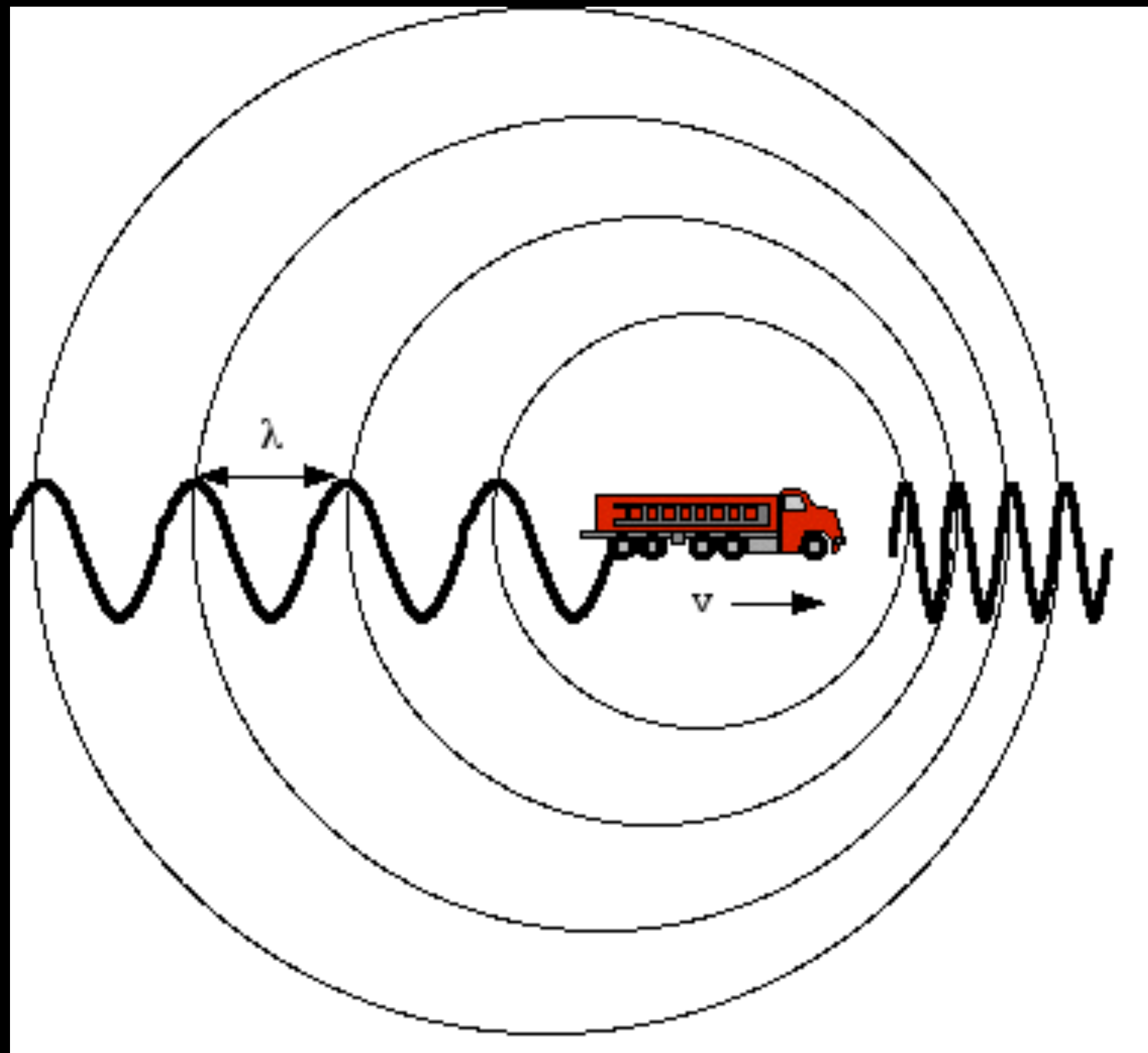
Expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :
Il n'y a pas de centre !



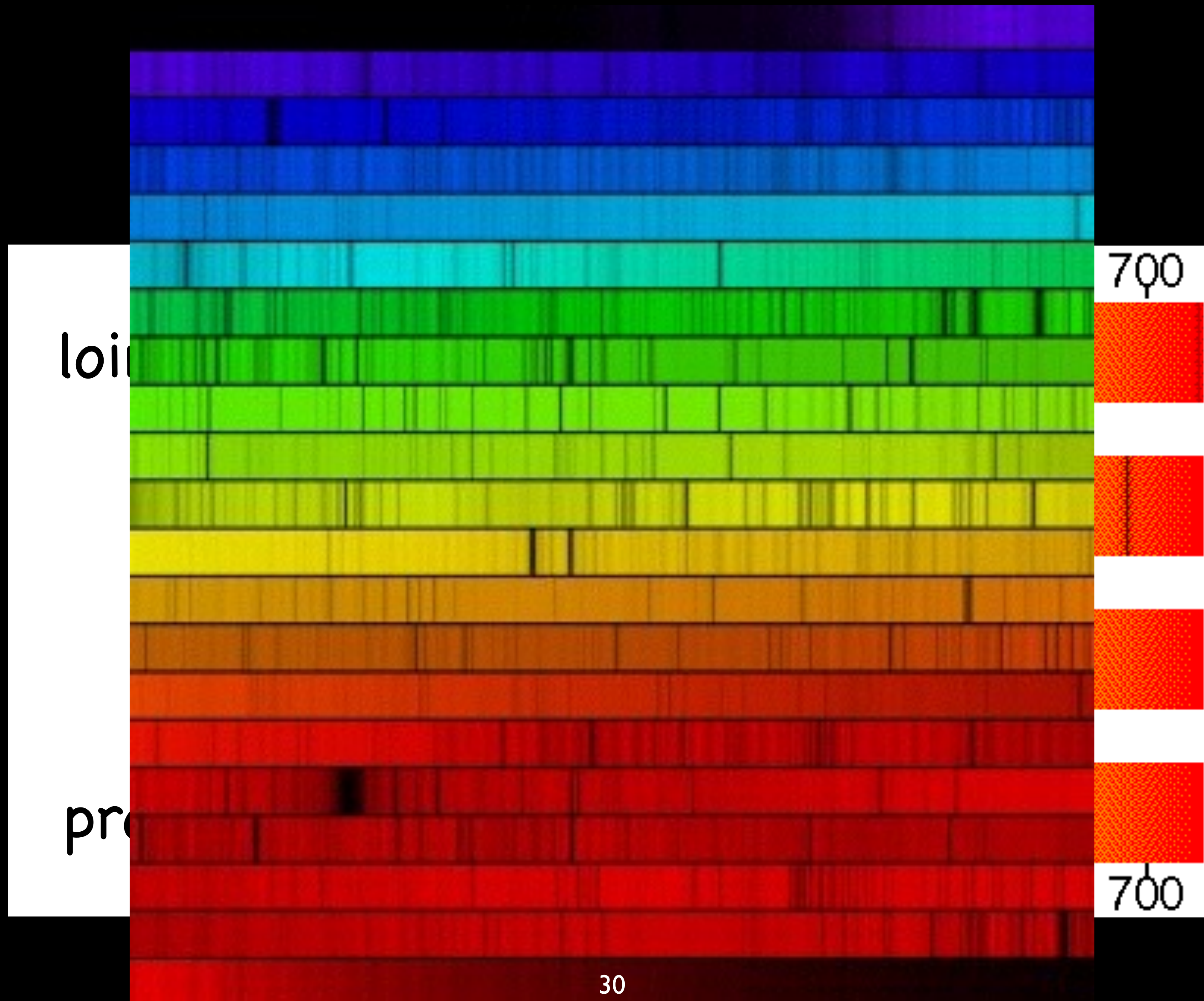
Expansion et décalage vers le rouge (redshift)

L'expansion de l'univers a un effet très important sur la lumière, analogue à l'effet Doppler sur le son (sirène des pompiers)



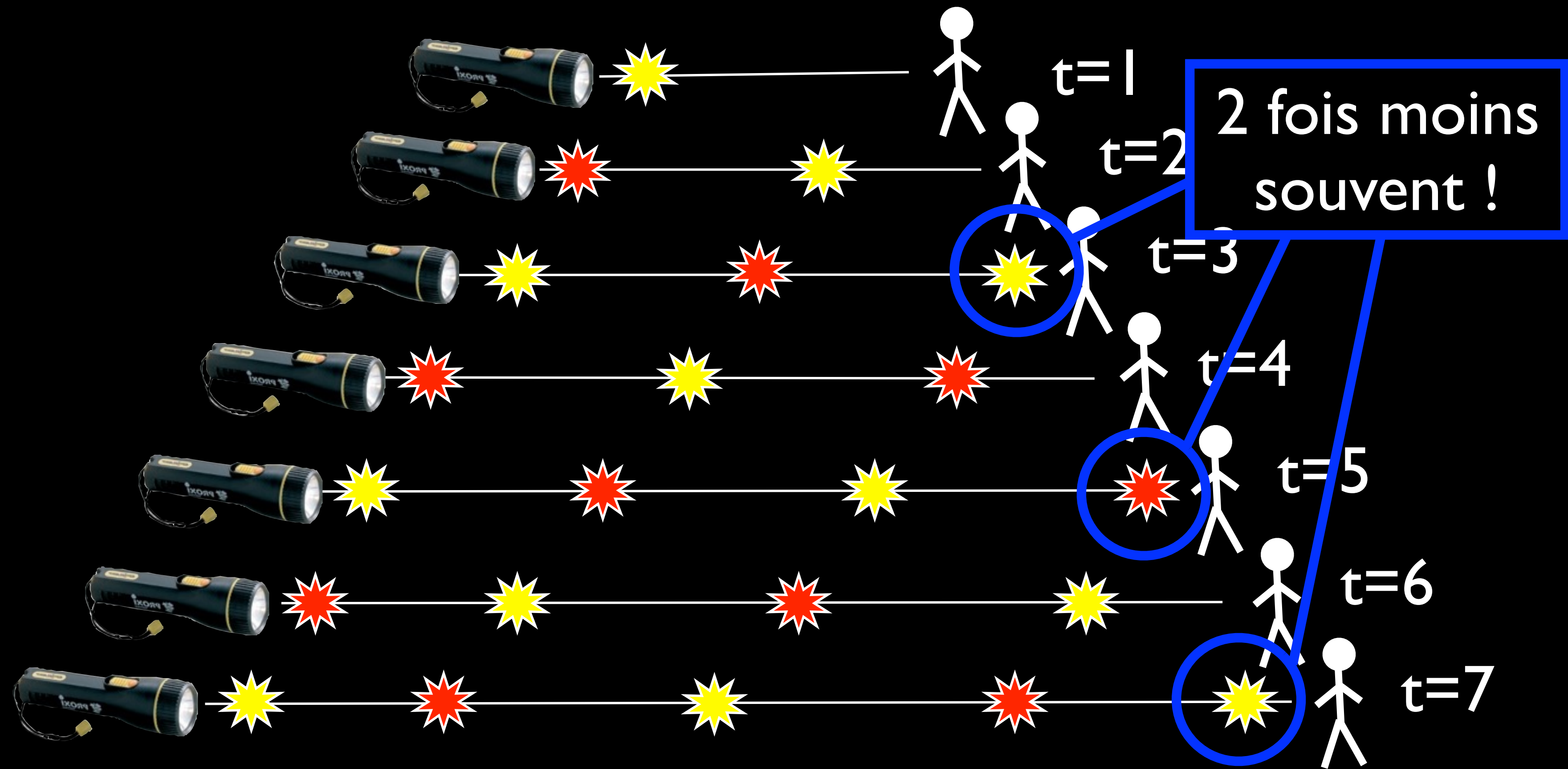
$$v = c/4$$

Le redshift (décalage vers le rouge)



Le redshift (décalage vers le rouge)

Pour le redshift, ce n'est pas un effet de vitesse mais un effet d'**augmentation de l'espace** lui-même



Le redshift (décalage vers le rouge)

$$z = \frac{\lambda_{\text{observée}} - \lambda_{\text{émise}}}{\lambda_{\text{émise}}}$$

$$z = \frac{a_{\text{réception}} - a_{\text{émission}}}{a_{\text{émission}}}$$

z grand \longleftrightarrow objet lointain dans l'espace ET dans le temps



Andromède : $z = 0.0002$!
~2.5 millions d'années-lumière

Le télescope spatial Hubble

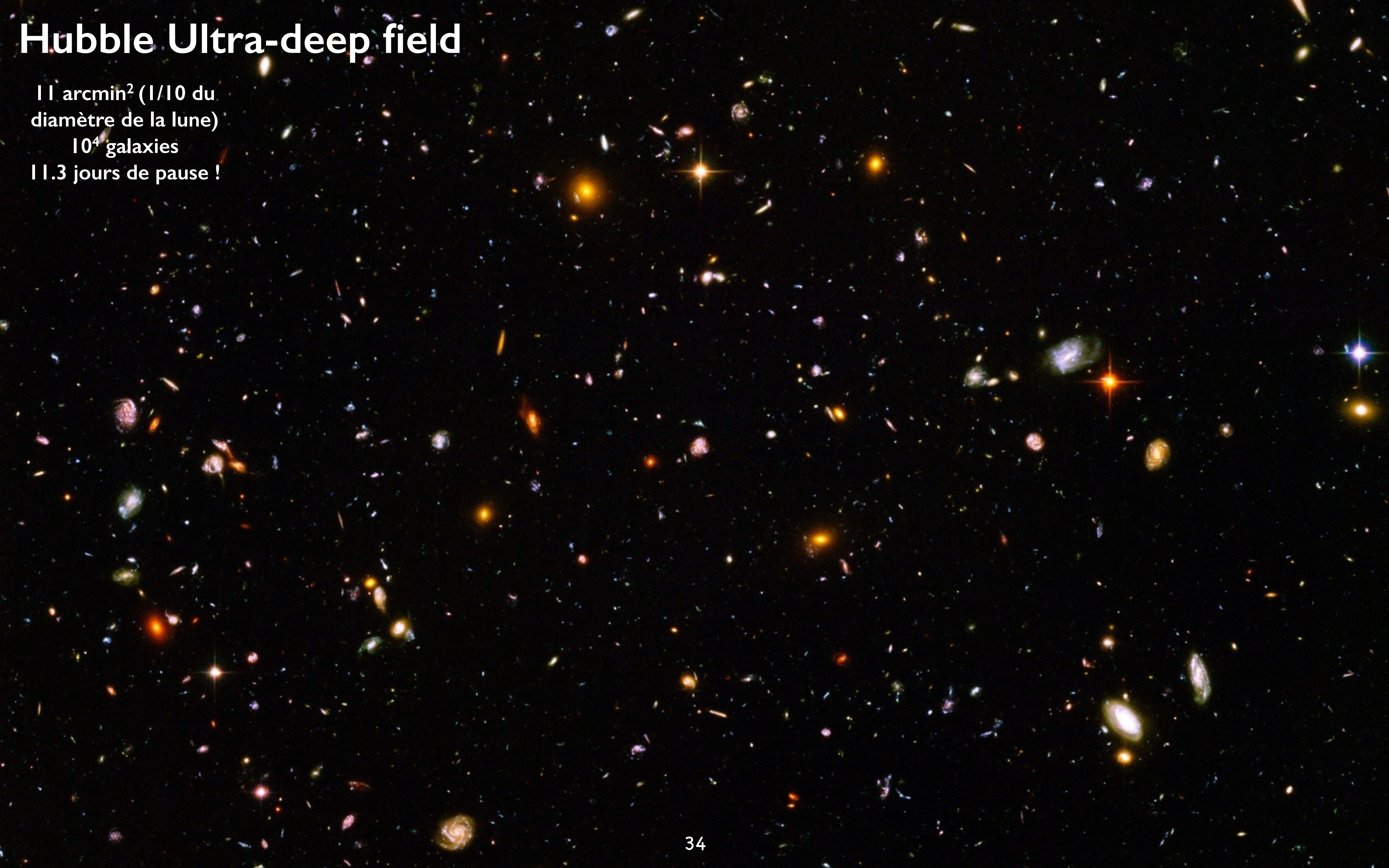


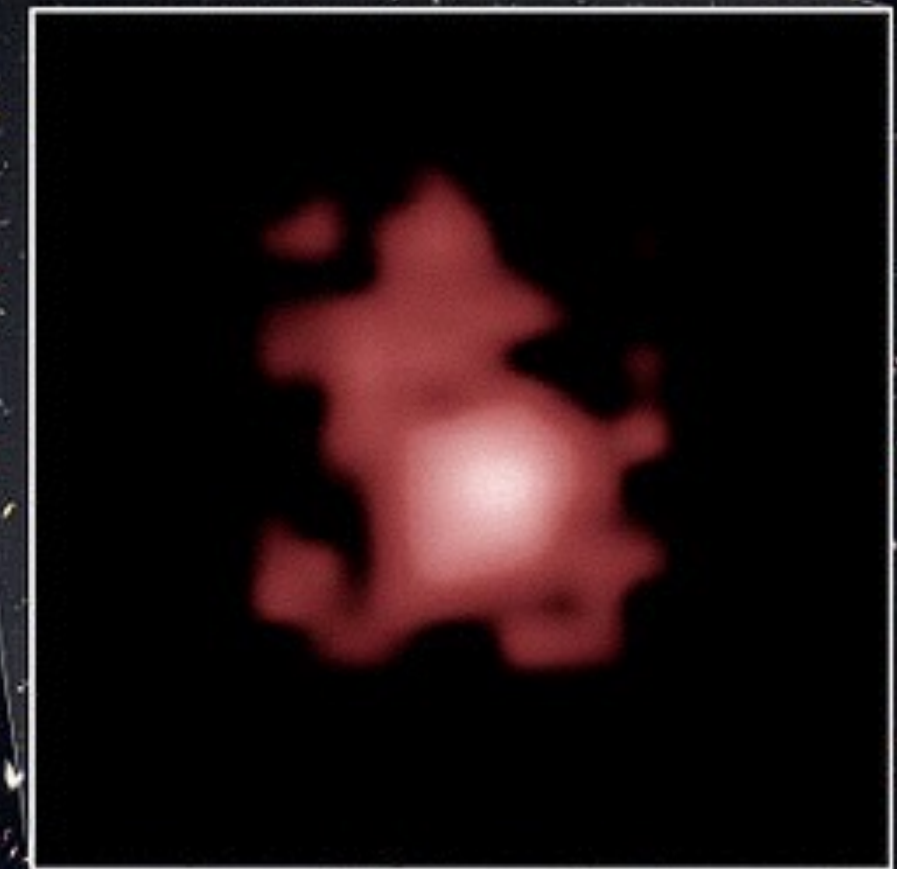
Hubble Ultra-deep field

11 arcmin² (1/10 du
diamètre de la lune)

10⁴ galaxies

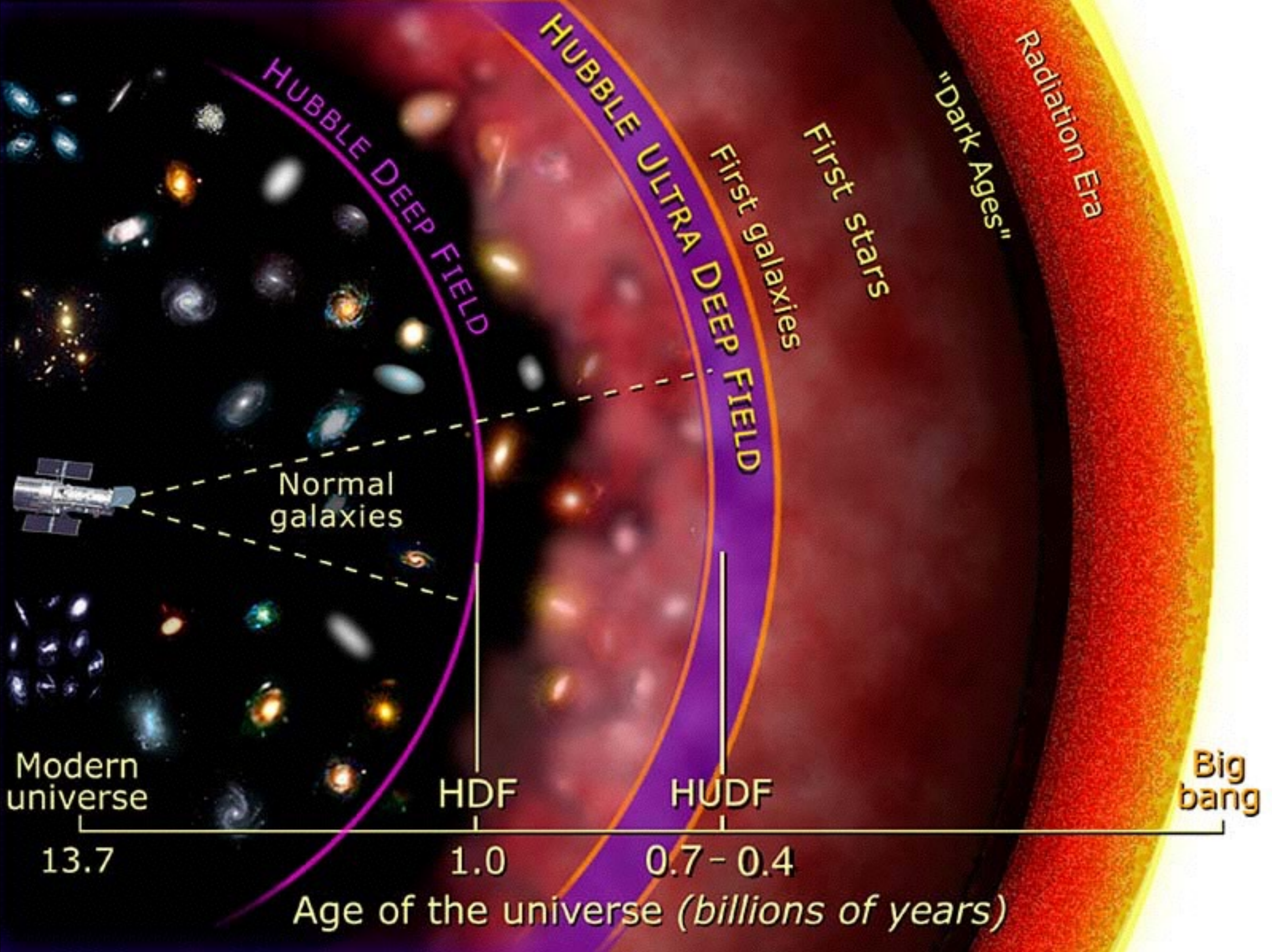
11.3 jours de pause !





Record de distance : 32 milliards
d'années lumière
soit $z=11.1$, 13.4 milliards d'années
univers âgé de 400 millions d'années
25 fois plus petite que notre galaxie,
100 fois moins d'étoiles (1 milliard)

Hubble Ultra-deep field



Les paramètres cosmologiques

Relativité générale et principe cosmologique

On peut résoudre les équations d'Einstein dès lors que l'on adhère au principe cosmologique :

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

Les paramètres cosmologiques

Nous obtenons une équation très simple :

$$\Omega_{\kappa} = \Omega_m + \Omega_{\Lambda} - 1$$

énergie due
à la courbure
de l'Univers

énergie due
à la matière
dans l'Univers

énergie due
à la constante
cosmologique

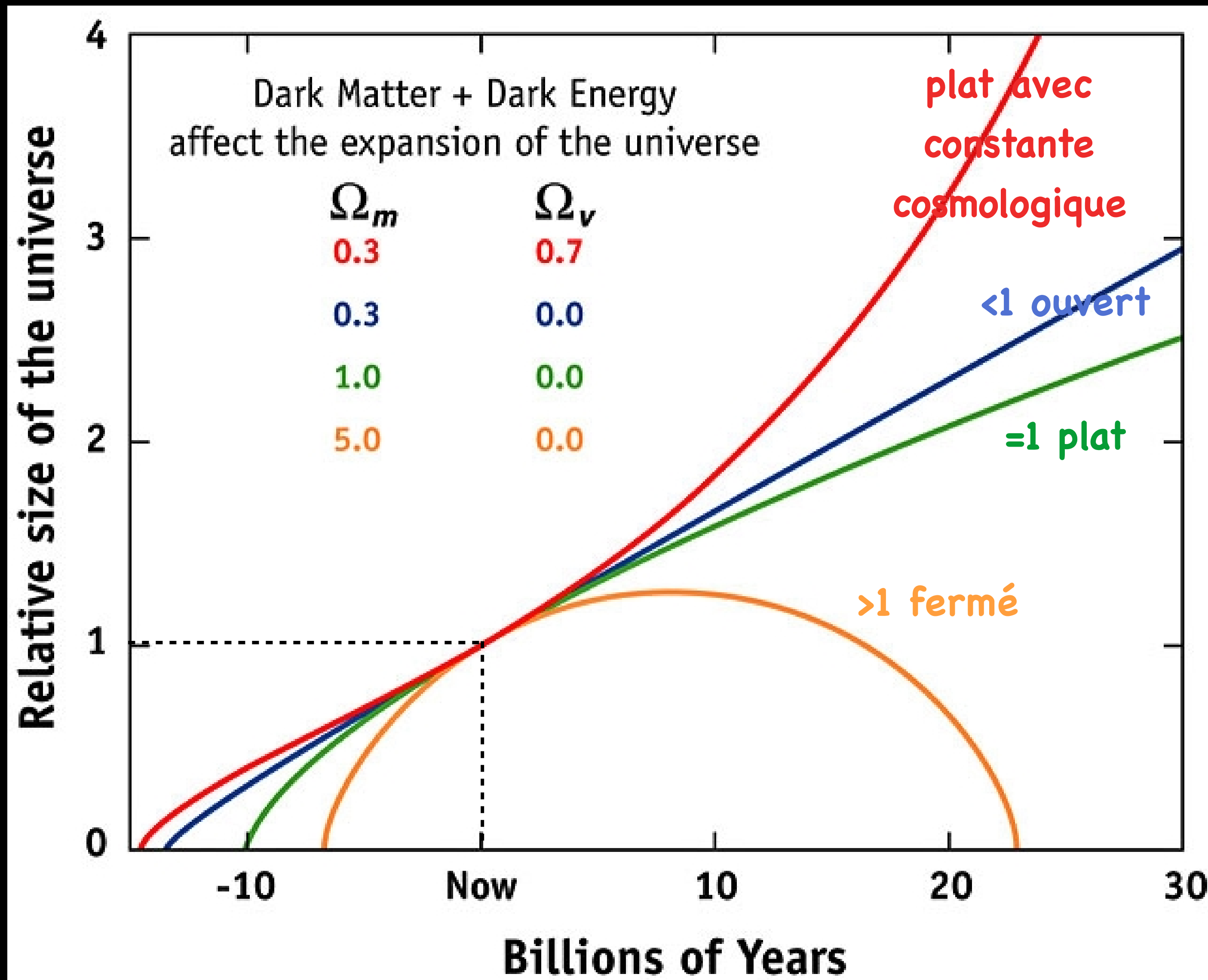
Les paramètres cosmologiques

$$\Omega_{\kappa} = \Omega_m + \Omega_{\Lambda} - 1$$

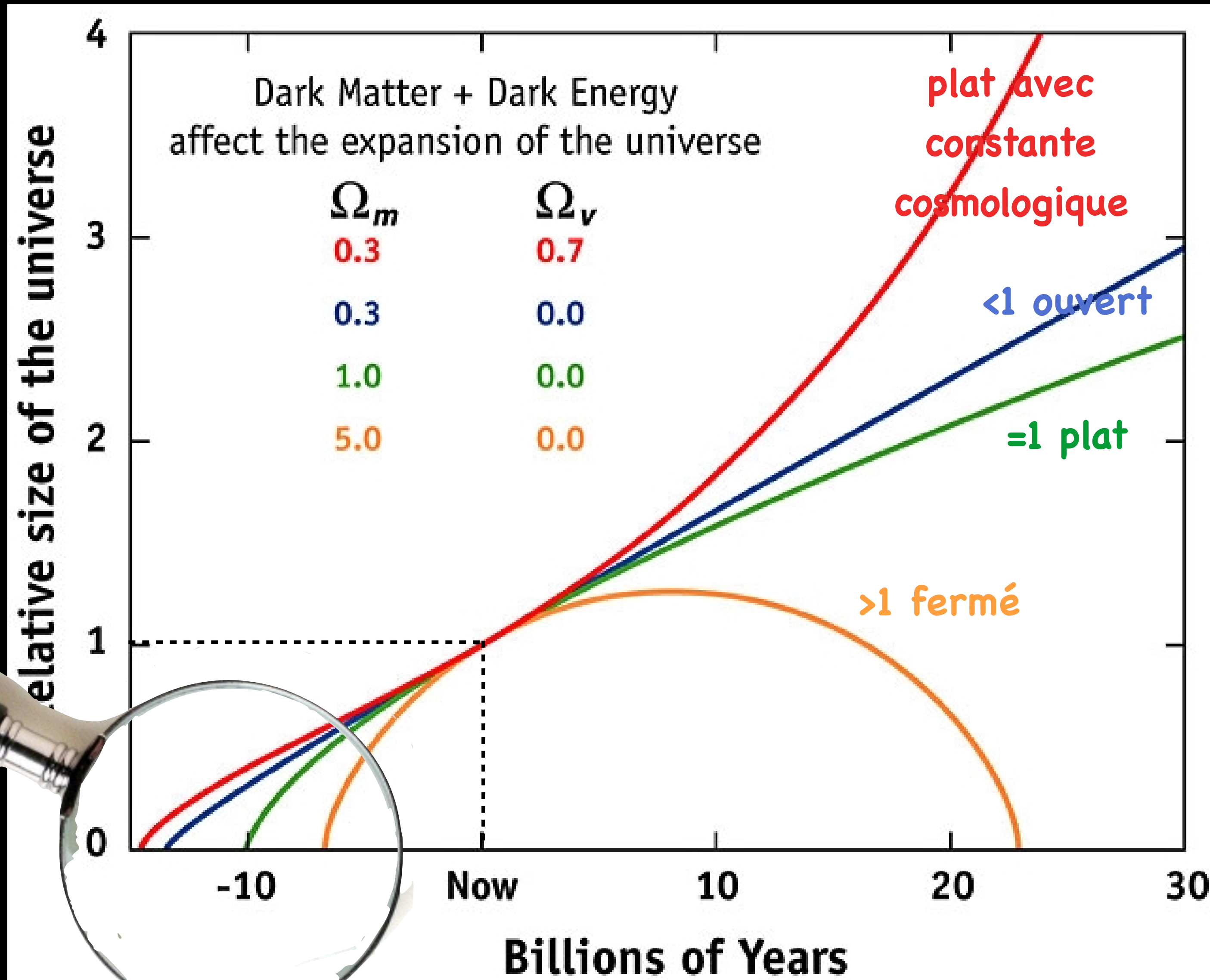
Objectif : mesurer les paramètres cosmologiques

$\Omega_m + \Omega_{\Lambda} > 1$	fermé	expansion éternelle ou Big-Crunch !
$\Omega_m + \Omega_{\Lambda} < 1$	ouvert (exponentiel)	expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_{\Lambda} = 1$	ouvert et plat	expansion éternelle

Les paramètres cosmologiques



Les paramètres cosmologiques



Le Big-Bang

Dans tous les modèles, l'univers devient très petit en allant vers le passé

Lemaître : modèle de l'atome primitif (1930), ancêtre du **Big-Bang**, repris en détail par **Gamow** à partir des années 40.



Rencontre cosmologie et physique nucléaire

The Origin of Elements and the Separation of Galaxies

G. GAMOW

George Washington University, Washington, D. C.

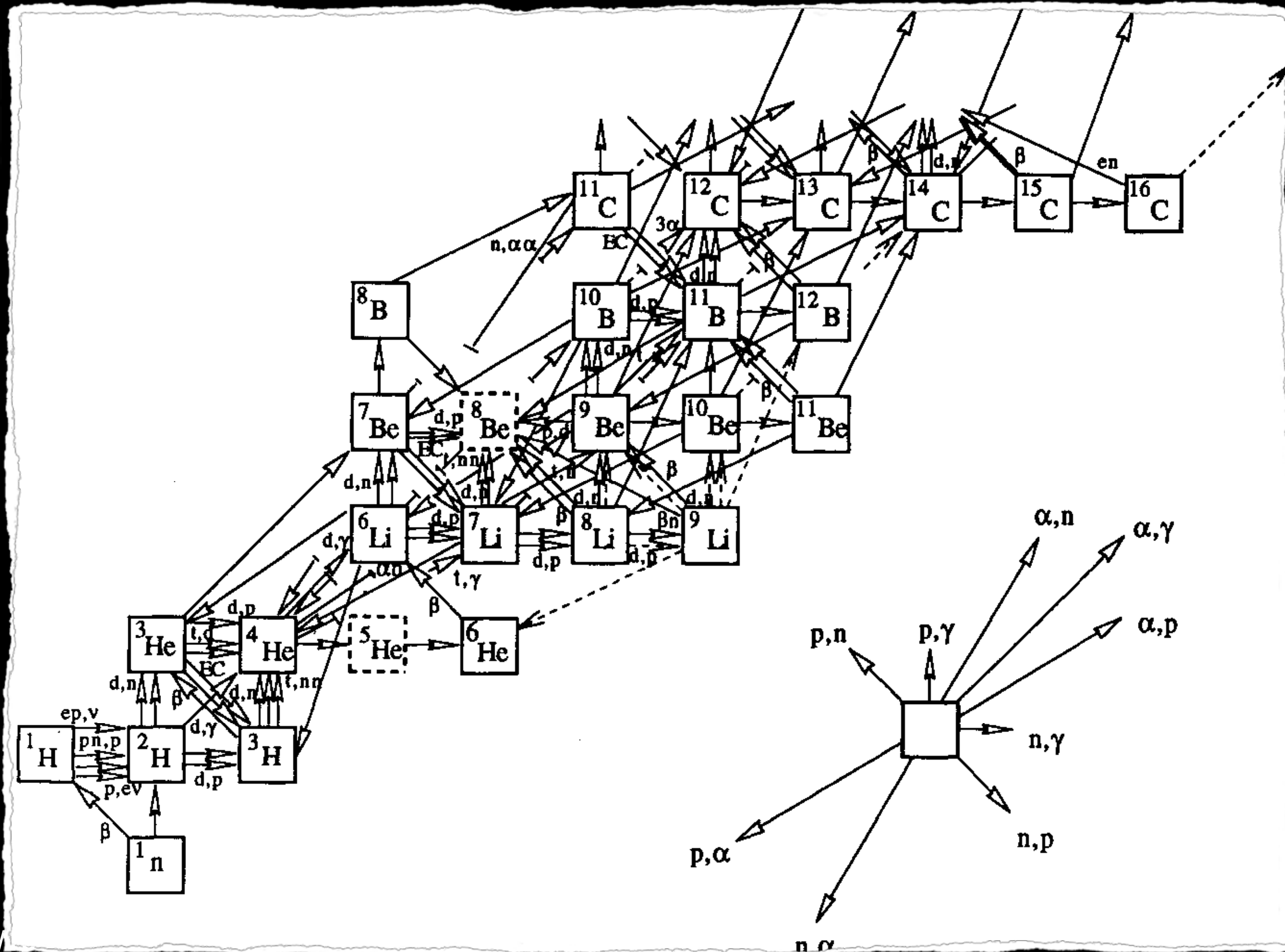
June 21, 1948

Nucléosynthèse primordiale

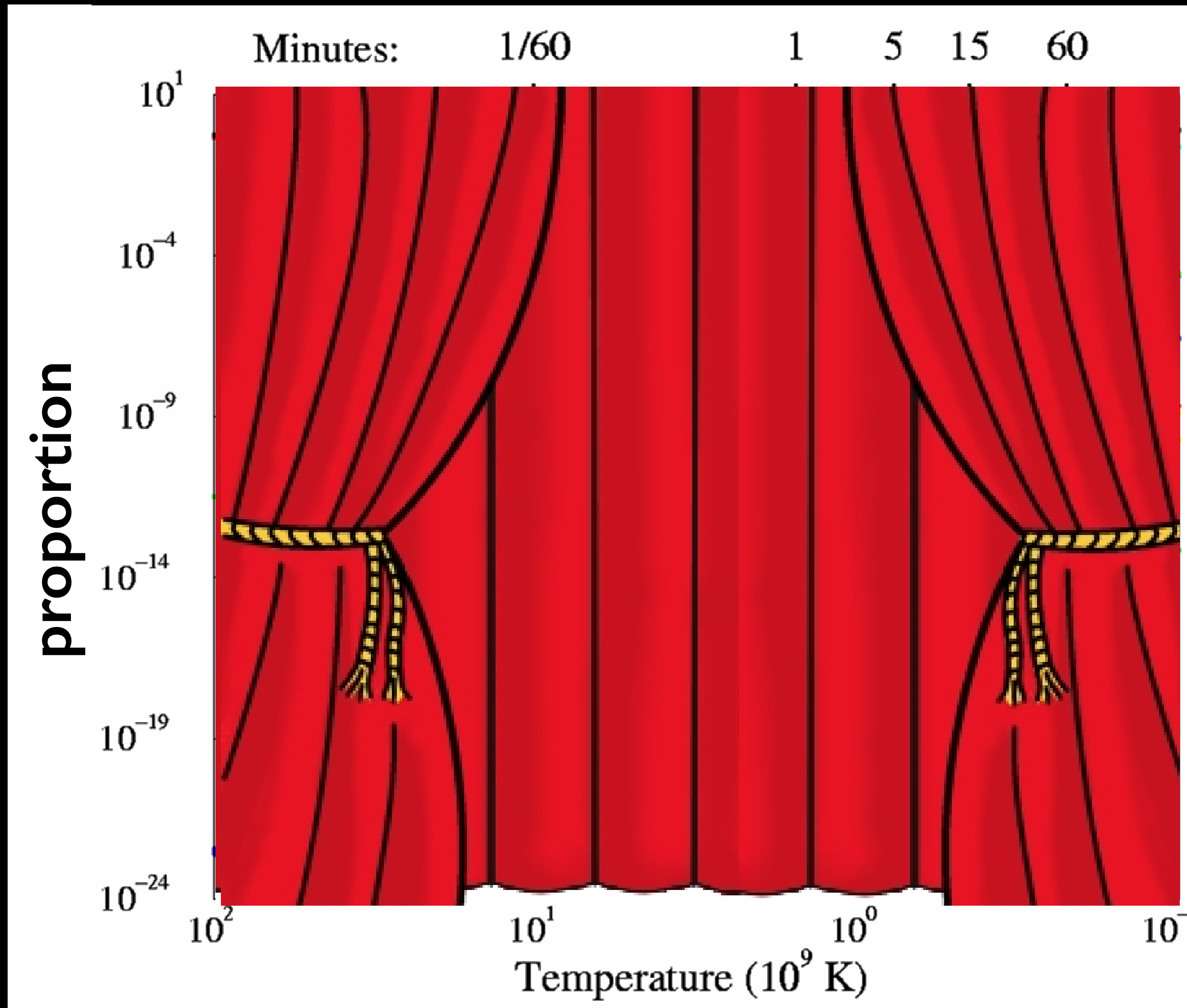
- l'univers est en expansion (on le sait depuis Lemaître et Hubble)
- il était donc plus petit et donc plus chaud dans le passé
- en 1948 : la physique nucléaire est bien comprise et Bethe avait montré que le cœur des étoiles produit des atomes “lourds” par réactions de fusion lors de la **nucléosynthèse stellaire**
- Gamow démontre que l'univers très jeune devait se comporter comme le cœur d'une étoile : c'est la **nucléosynthèse primordiale** (formation des noyaux et non des atomes)

Nucléosynthèse primordiale

l'hélium est le plus stable : sa synthèse est largement favorisée



Nucléosynthèse primordiale



Nucléosynthèse primordiale

Cet excellent accord du modèle du avec les mesures font de la nucléosynthèse un des piliers du Big Bang.

Il existe un autre pilier, tout aussi important :
le rayonnement fossile.

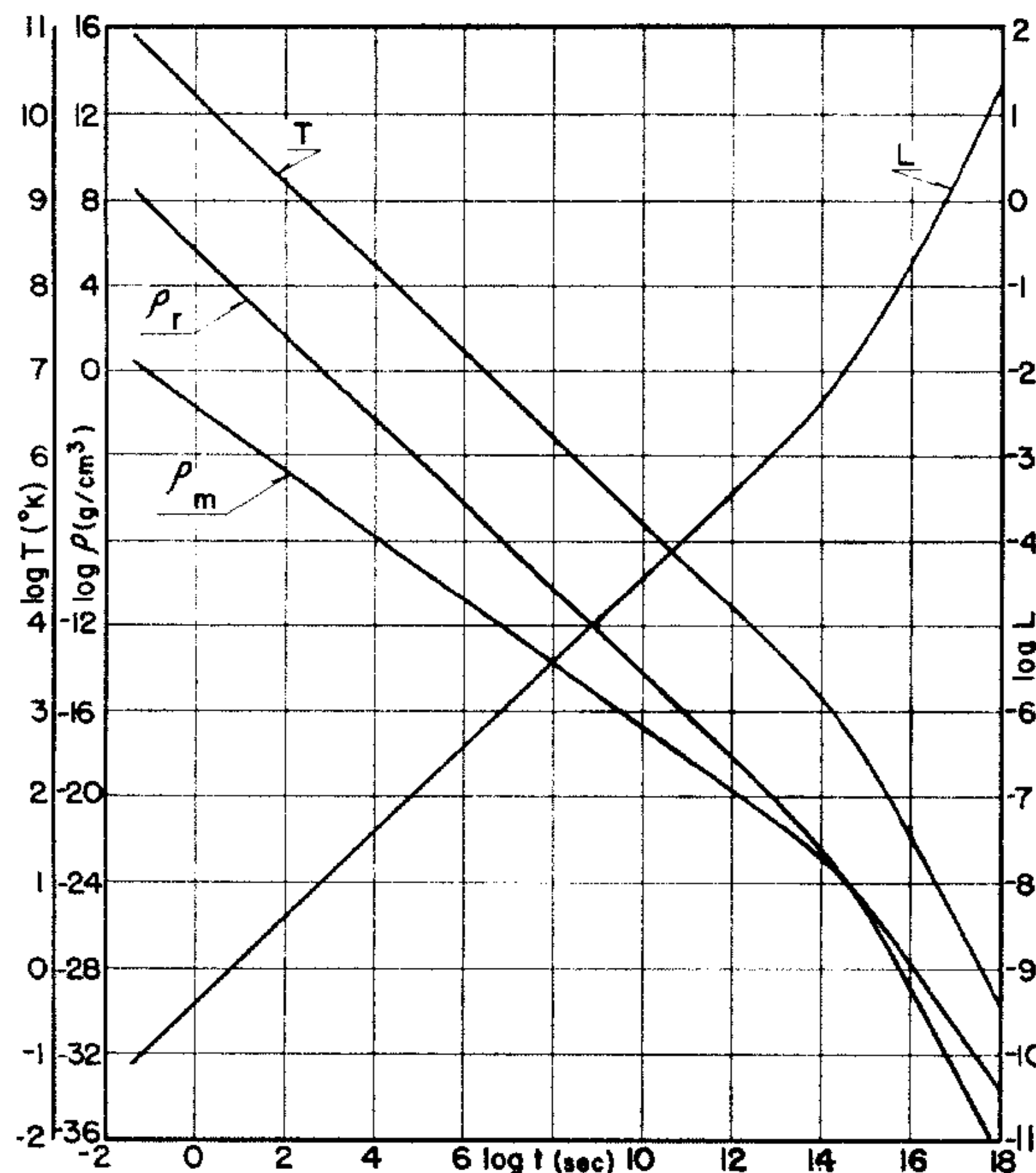
Le rayonnement fossile

Remarks on the Evolution of the Expanding Universe*†

RALPH A. ALPHER AND ROBERT C. HERMAN

Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland

(Received December 27, 1948)



As discussed elsewhere,^{6,7} the temperature during the element-forming process must have been of the order of 10^8 – 10^{10} °K. This temperature is limited, on the one hand, by photo-disintegration and thermal dissociation of nuclei and, on the other hand, by the lack of evidence in the relative abundance data for resonance capture of neutrons. For purposes of simplicity we have chosen

$$\rho_{r'} \cong 1 \text{ g/cm}^3, \quad (12c)$$

which corresponds to $T \cong 0.6 \times 10^9$ °K at the time when the neutron capture process became important.

In accordance with Eq. (4), the specification of $\rho_{m''}$, $\rho_{m'}$, and $\rho_{r'}$ fixes the present density of radiation, $\rho_{r''}$. In fact, we find that the value of $\rho_{r''}$ consistent with Eq. (4) is

$$\rho_{r''} \cong 10^{-32} \text{ g/cm}^3, \quad (12d)$$

which corresponds to a temperature now of the order of 5°K. This mean temperature for the universe is to be interpreted as the background temperature which would result from the universal

Le rayonnement fossile

Origine du rayonnement fossile ?

il provient de la fin de la cuisson de la soupe cosmique !

la cuisson s'arrête car la soupe se dilue et que la
température diminue,
environ 380 000 après le Big-Bang

Le rayonnement fossile

Interactions nombreuses entre photons d'une part et baryons d'autre part : **équilibre**, tant que les interactions ont lieu

l'univers est alors **opaque** !

MAIS l'univers est en expansion :

les interactions se font de plus en plus rares jusqu'à ce que les **atomes** puissent se former ce qui "libère les photons"

l'univers devient **transparent** !

Le rayonnement fossile

2 critères :

proximité des ingrédients **taille de l'univers**
température de la casserole **température de l'univers**

- photons
- protons
- électrons



Univers petit
température élevée

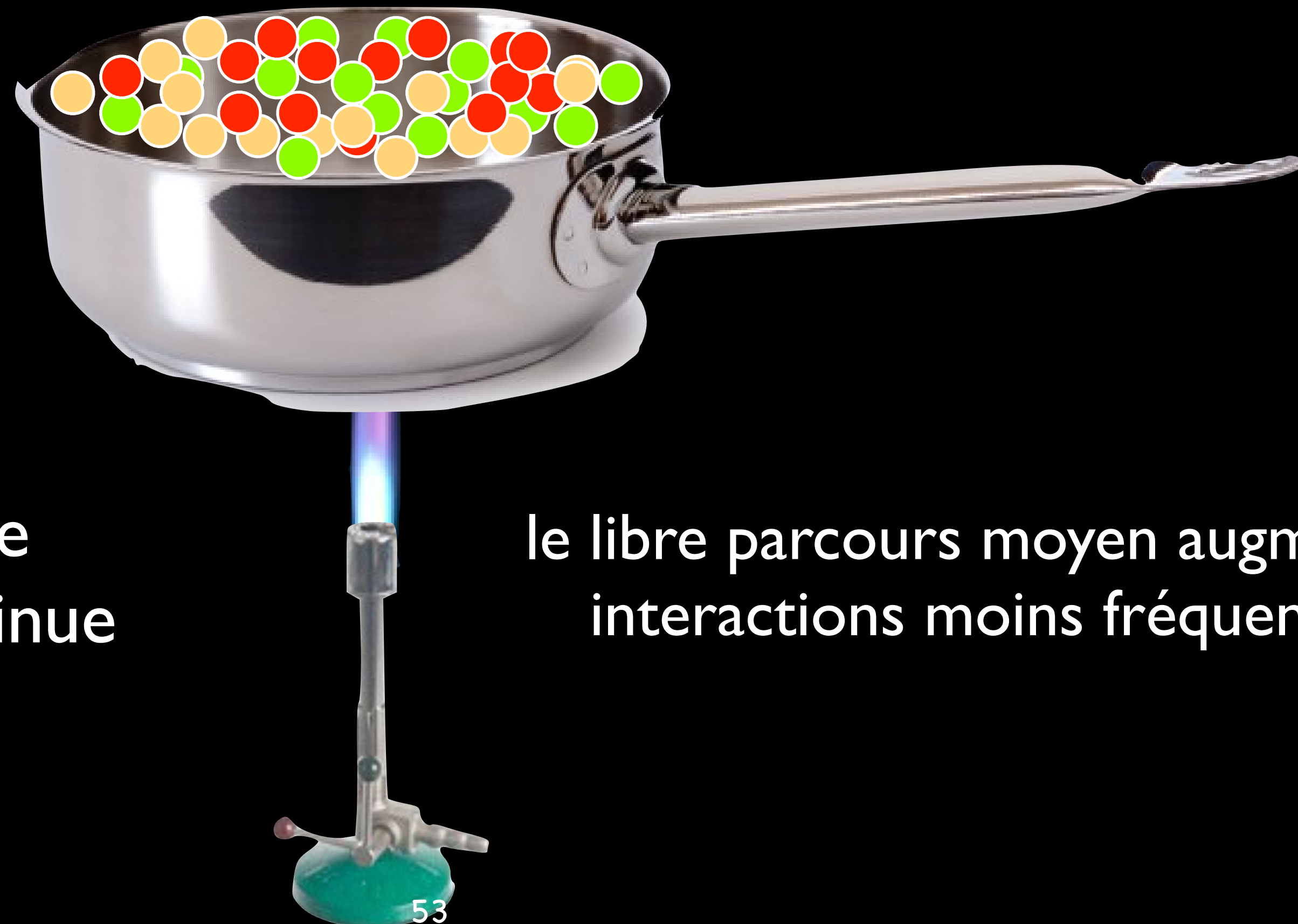
libre parcours moyen petit,
interactions fréquentes

Le rayonnement fossile

2 critères :

proximité des ingrédients **taille de l'univers**
température de la casserole **température de l'univers**

- photons
- protons
- électrons



l'Univers se dilate
la température diminue

le libre parcours moyen augmente,
interactions moins fréquentes

Le rayonnement fossile

2 critères :

proximité des ingrédients **taille de l'univers**
température de la casserole **température de l'univers**



● photons

● atomes neutres

sous une certaine température, les électrons forment des atomes d'hydrogène avec les protons : c'est la **recombinaison**, ou le **découplage**

Le rayonnement fossile

Le calcul montre que le découplage a eu lieu à

$$t_{\text{dec}} \sim 380\,000 \text{ ans}$$

$$z_{\text{dec}} \sim 1\,100$$

et que

$$T_{\text{dec}} \sim 3\,000 \text{ K}$$

or

$$T_0 = \frac{T}{1+z} \text{ donc}$$

$$T_0 \sim 3 \text{ K}$$

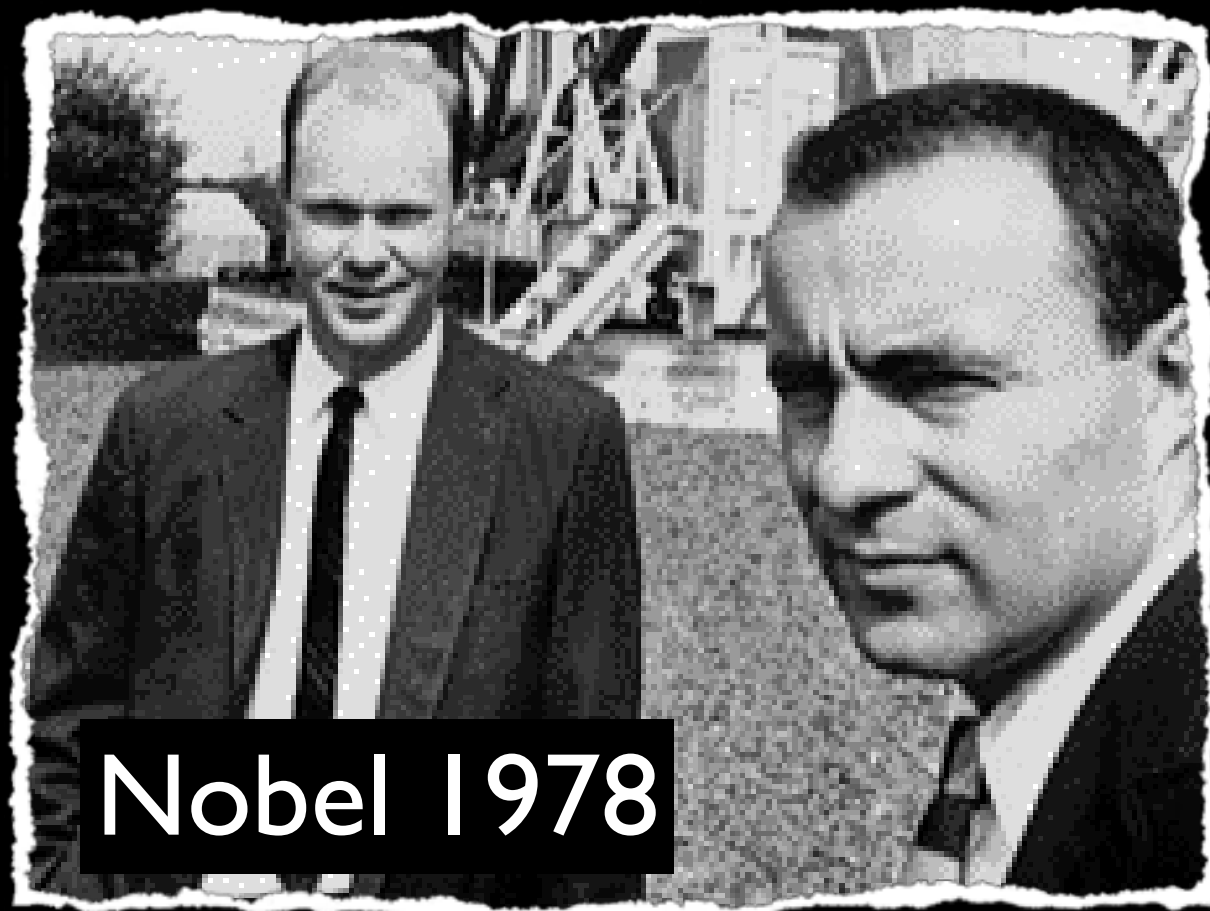
Le rayonnement fossile

$$t_{\text{dec}} \sim 380\,000 \text{ ans}$$

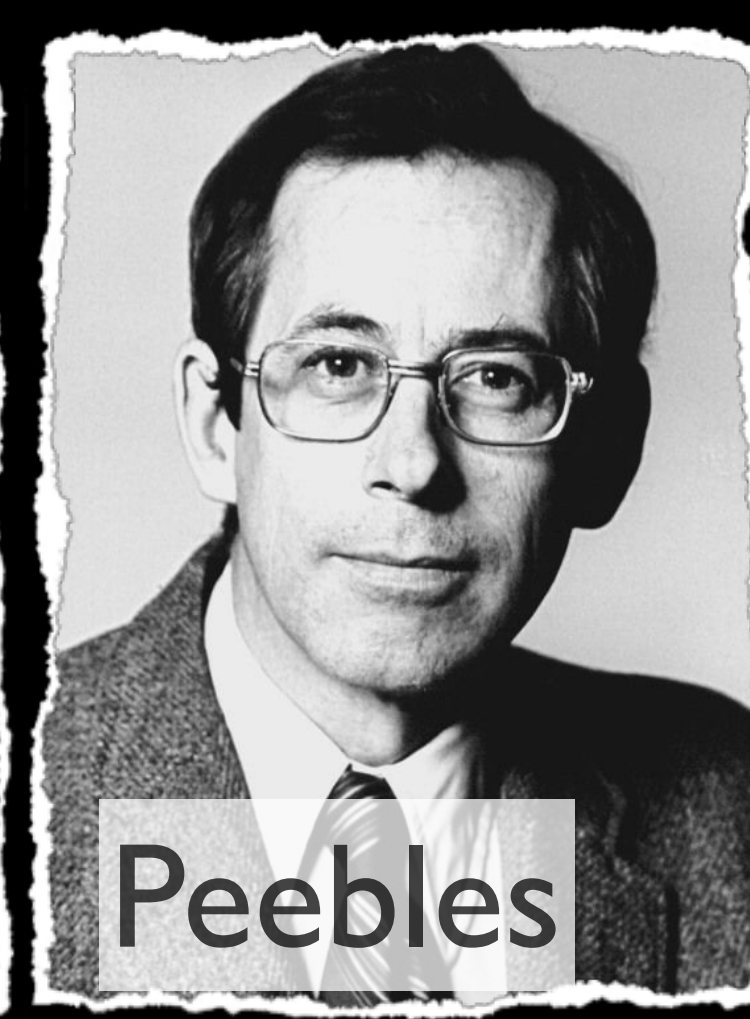
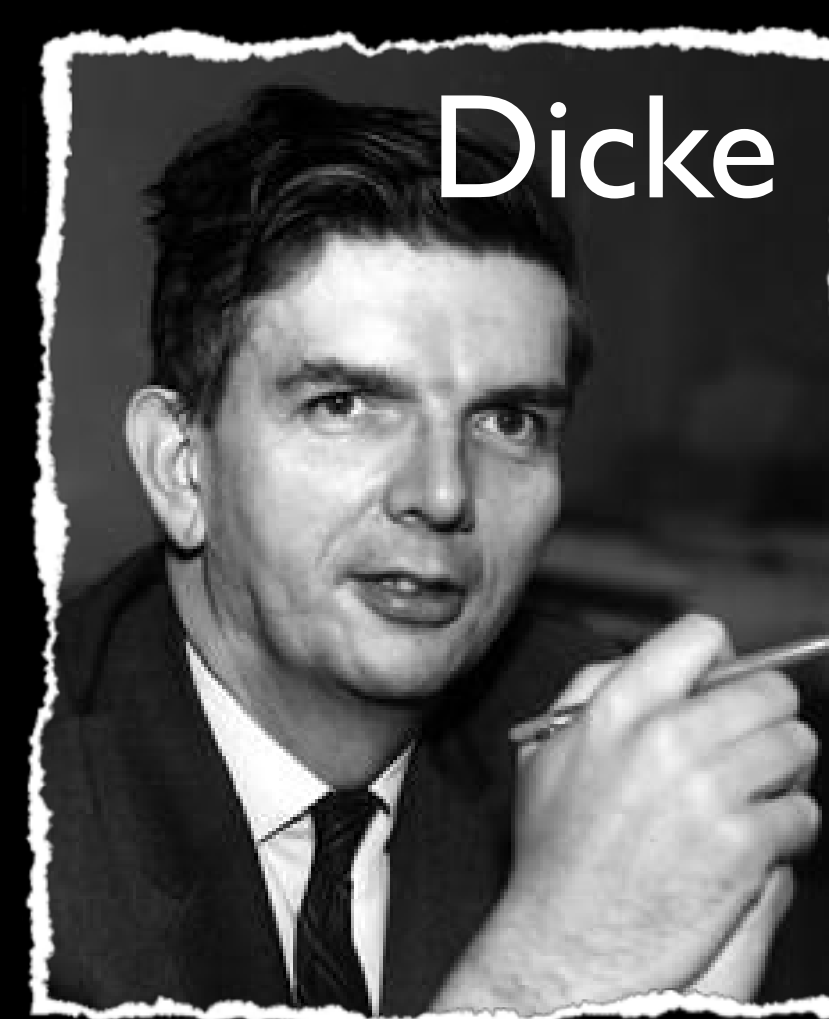
si 14 milliards d'années = 80 ans
alors 380 000 ans = 19 heures
après la naissance !!!!

le rayonnement fossile nous donne accès à
la tendre enfance de l'univers





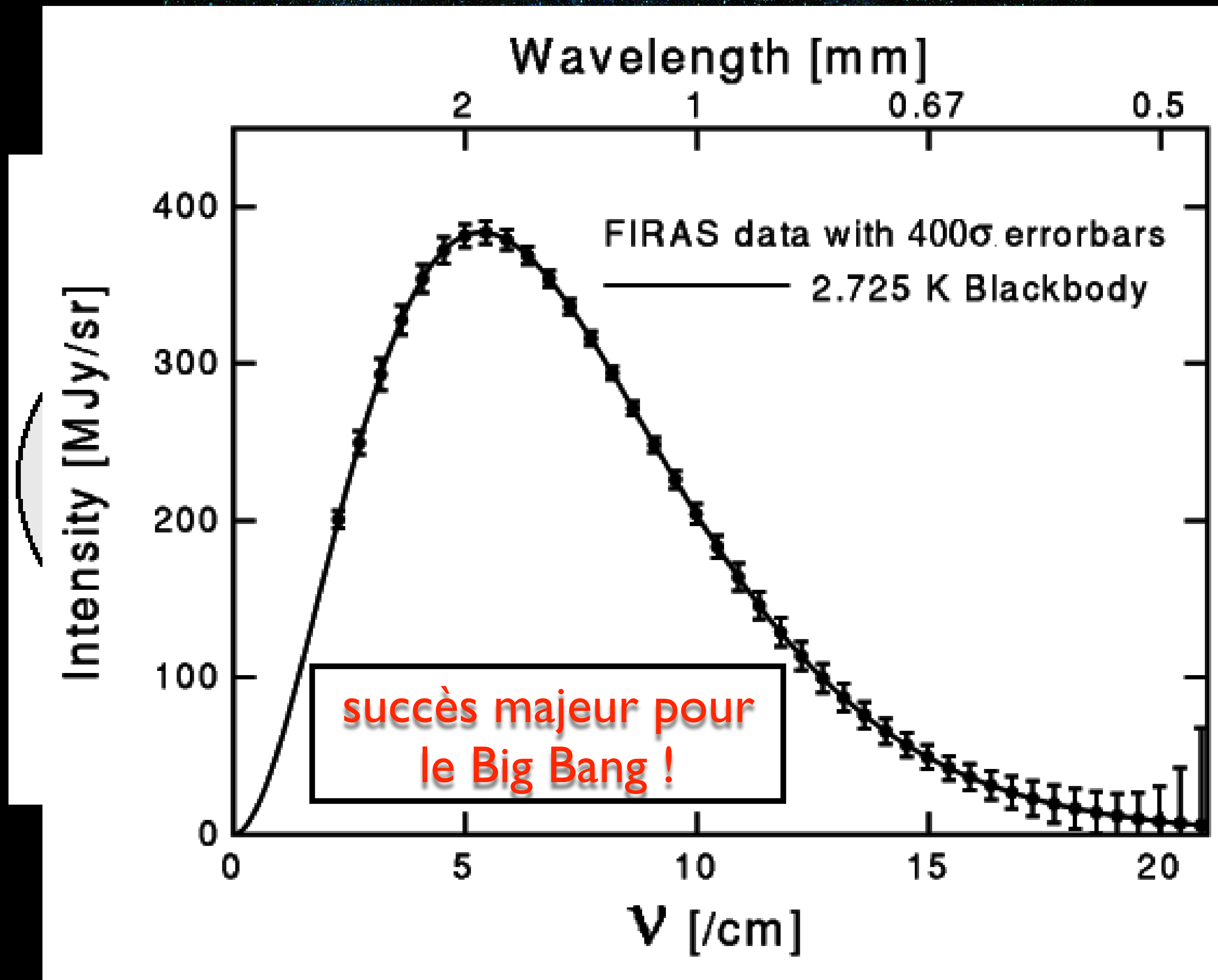
Le rayonnement fossile



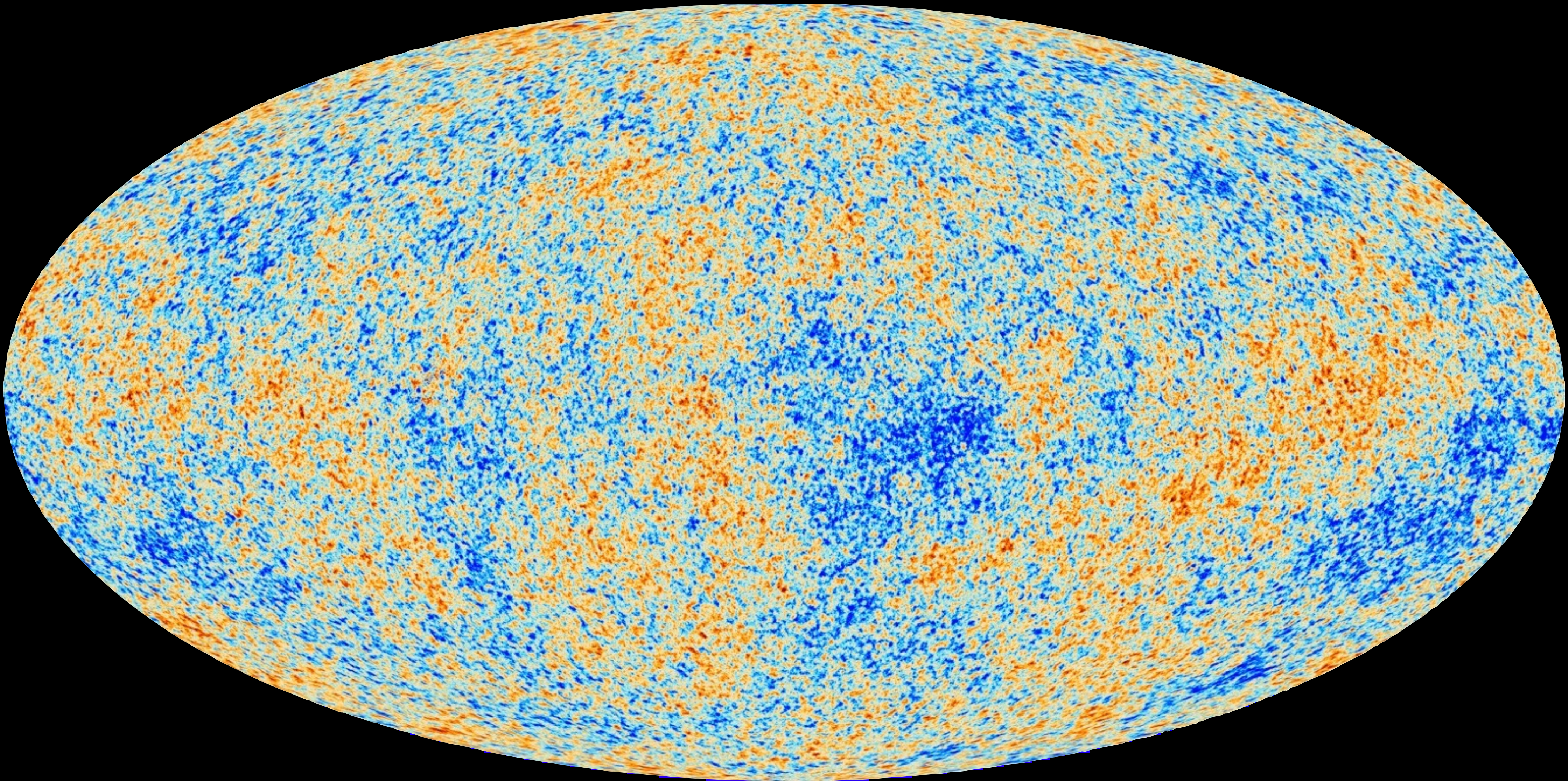
A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

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.

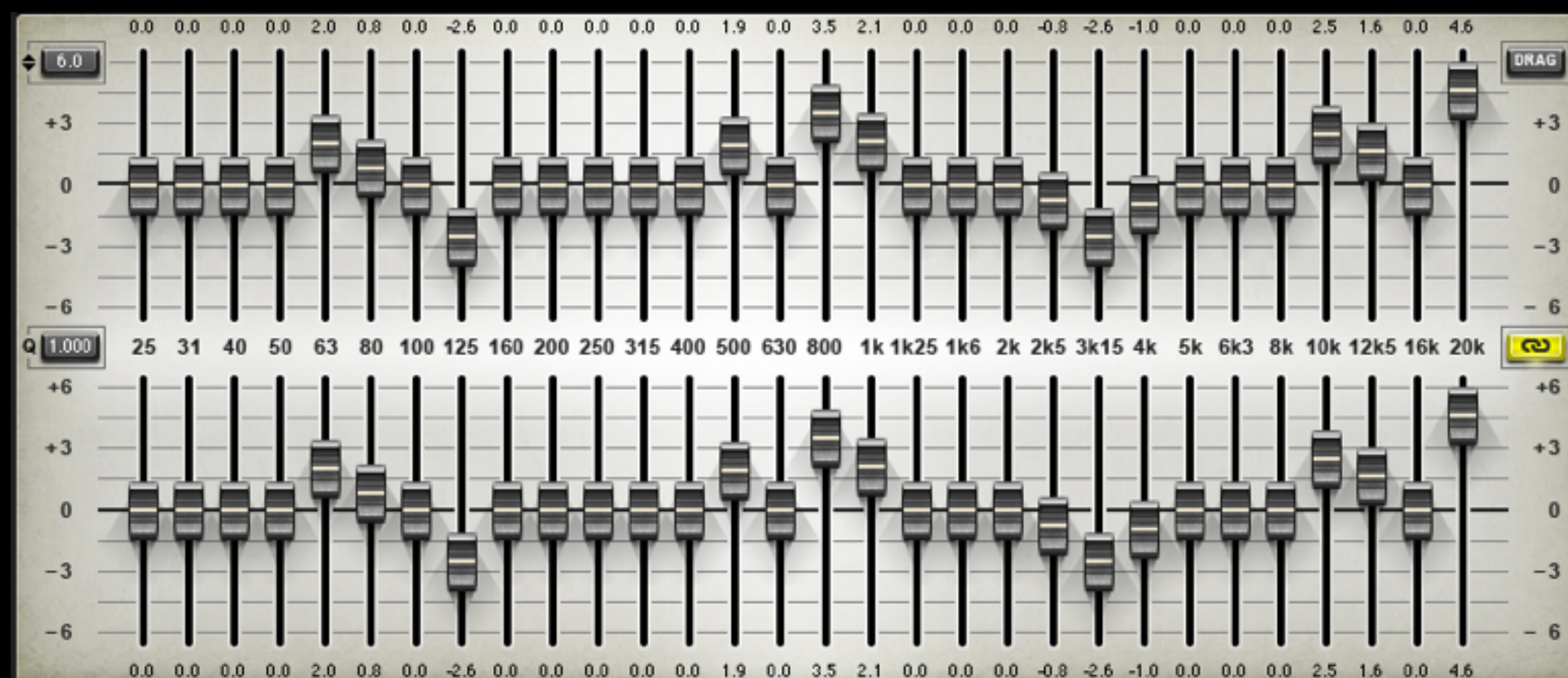
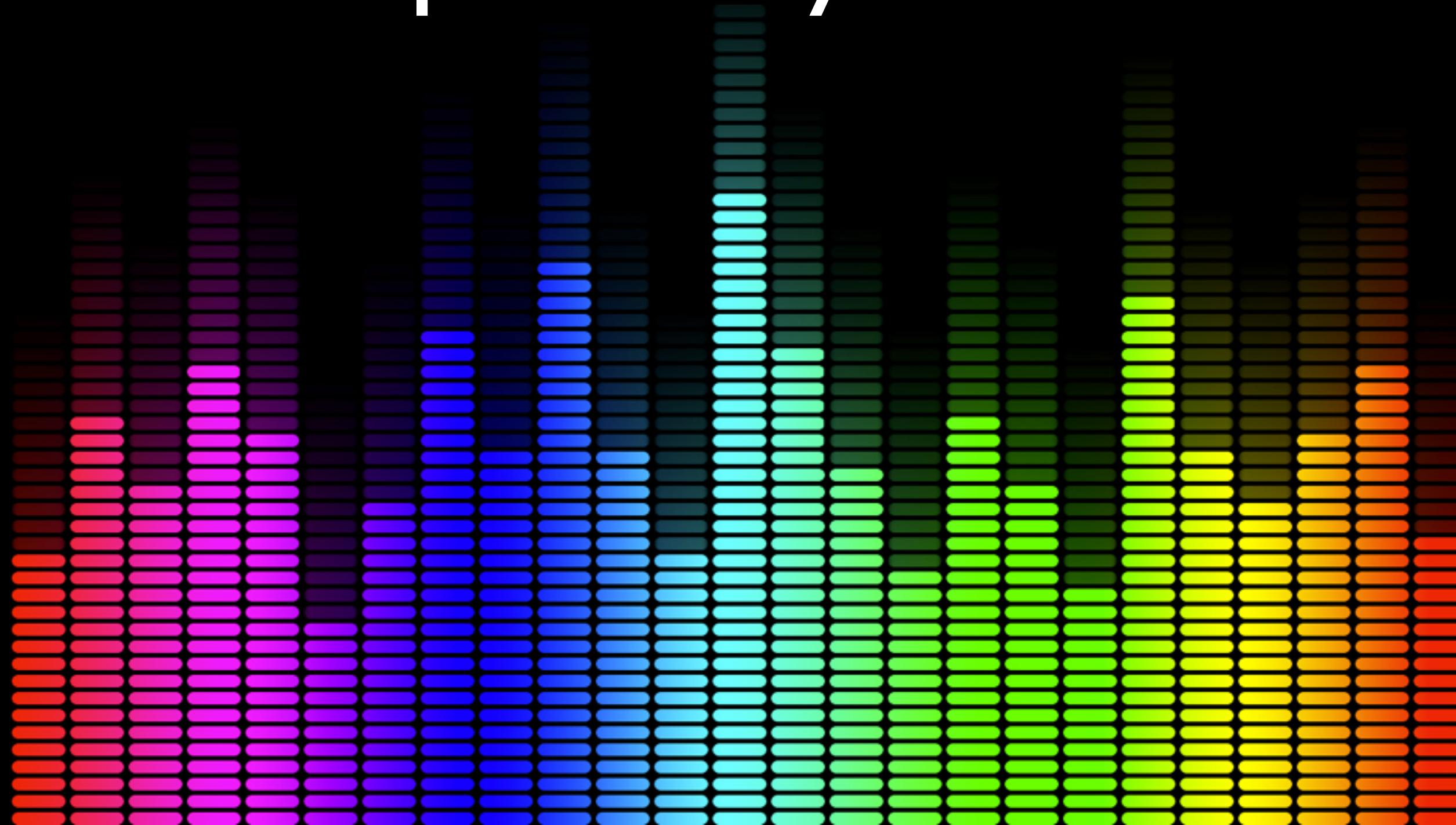
Le rayonnement fossile



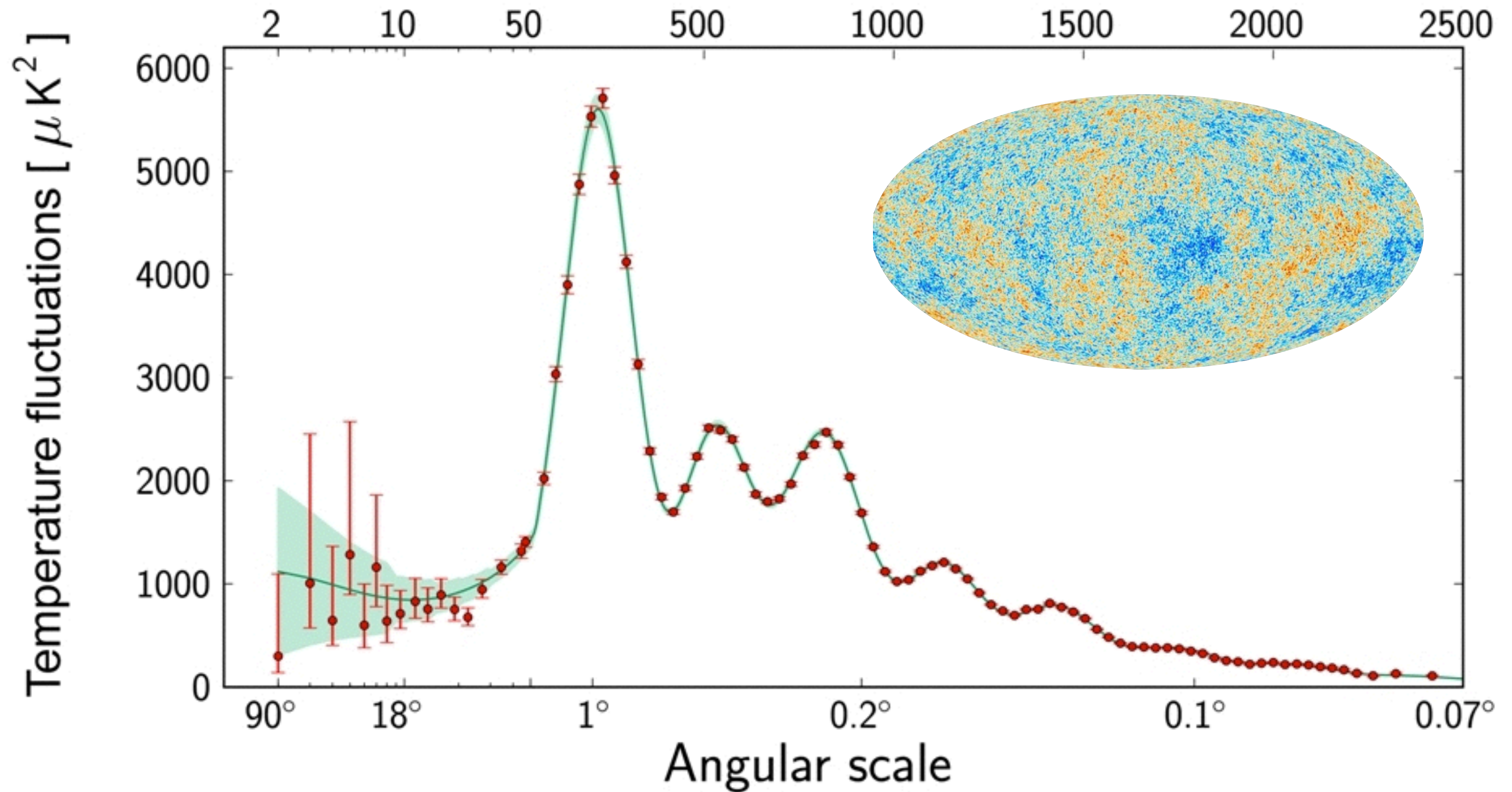
Le rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile



$$\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$$

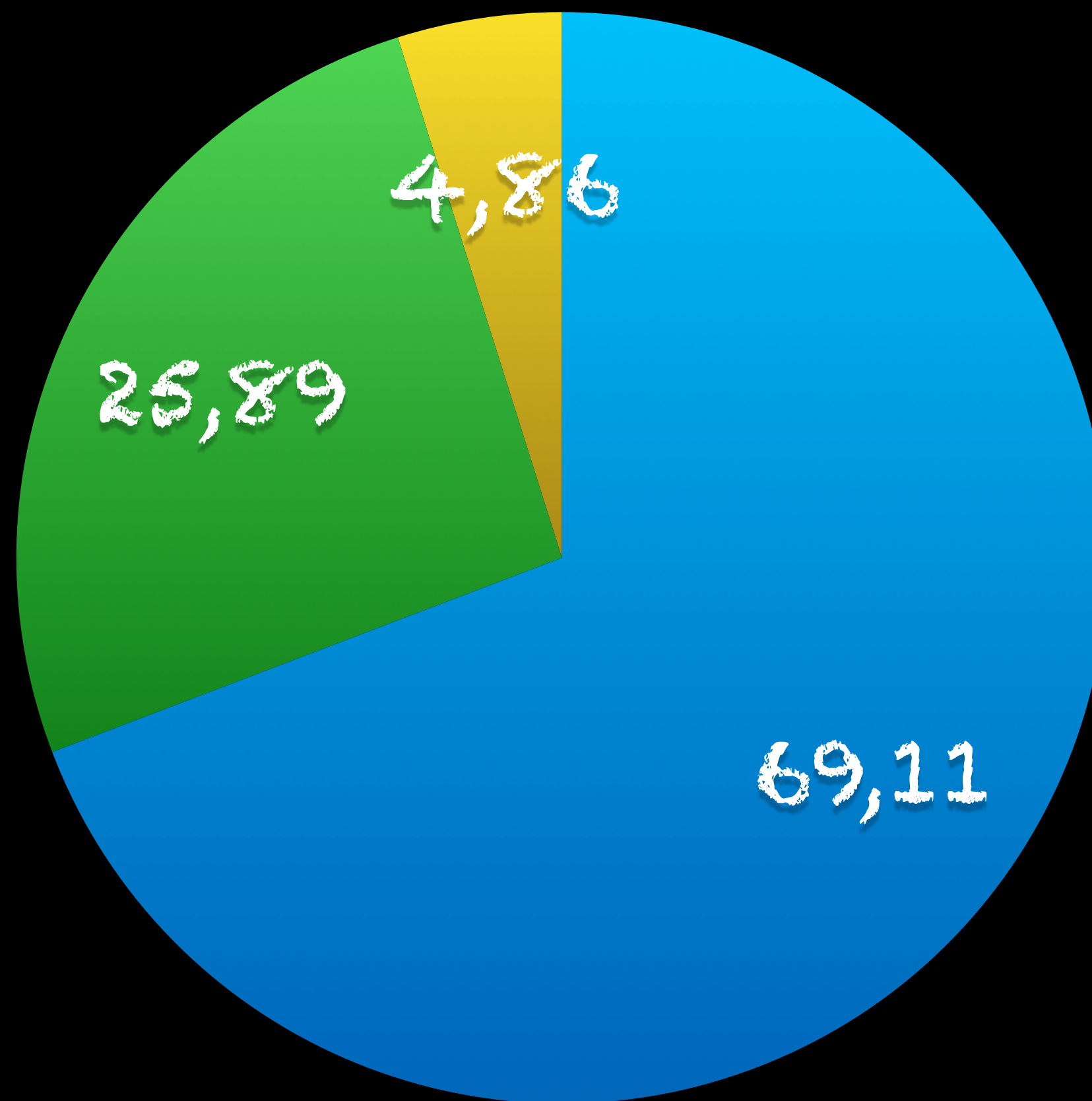
Mesure des paramètres cosmologiques

t_0	13.799 ± 0.021 Gyr
H_0	67.74 ± 0.46 km/s/Mpc
Ω_b	0.0486 ± 0.0010
Ω_c	0.2589 ± 0.0057
Ω_Λ	0.6911 ± 0.0062

$$\Omega_m = \Omega_c + \Omega_b$$

$$\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$$

Mesure des paramètres cosmologiques



matière noire : 85% de la matière dans l'univers !
énergie noire : 69% de la densité d'énergie de l'univers !

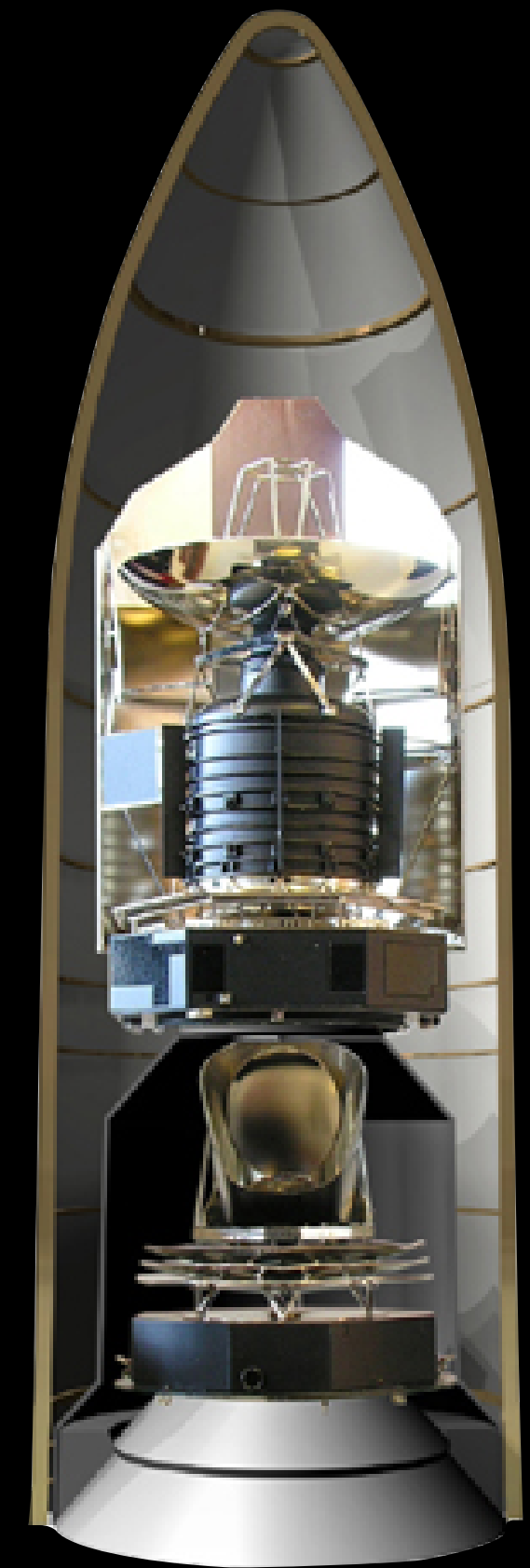
Planck

Lancé en mai 2009 !

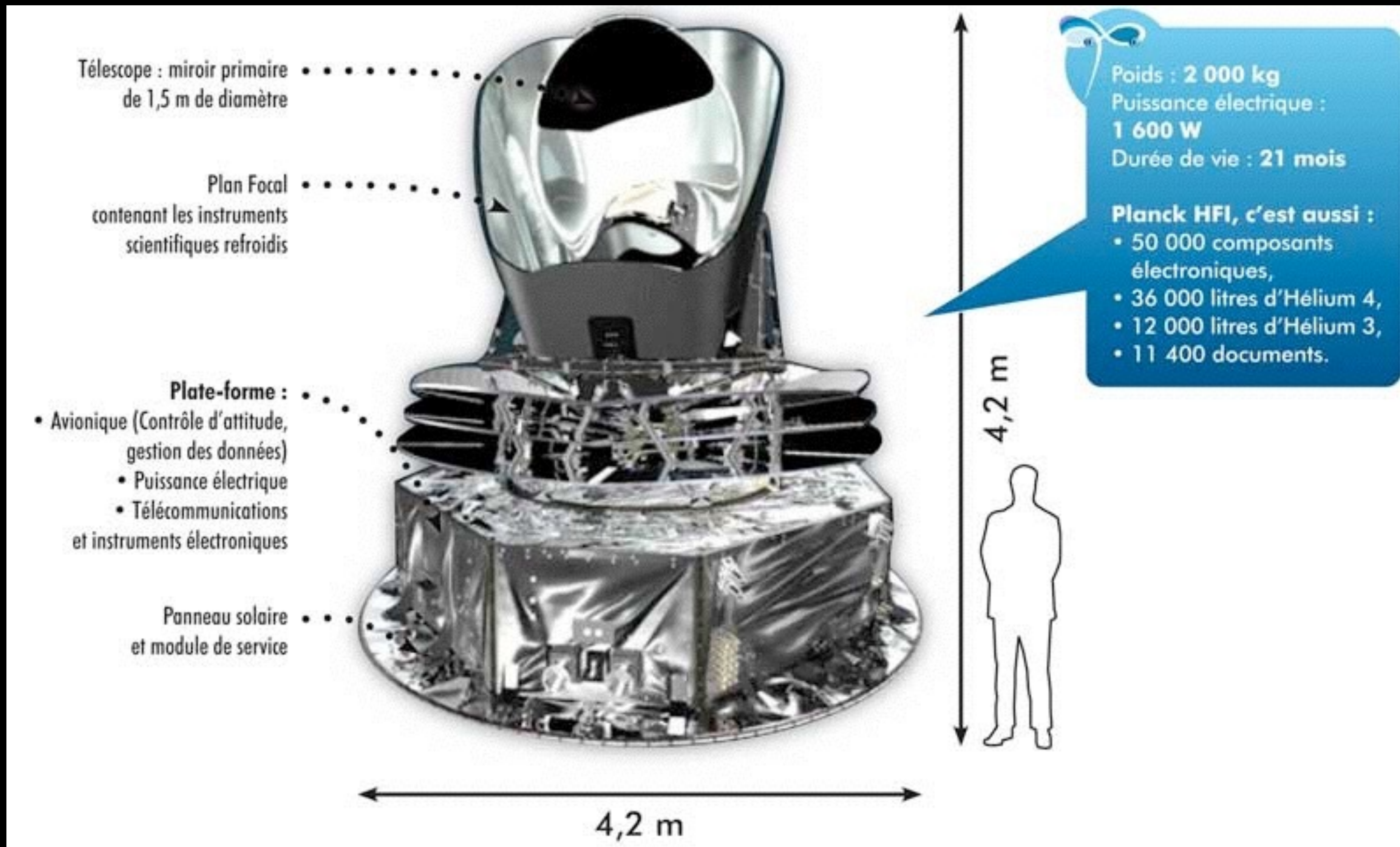


Herschel

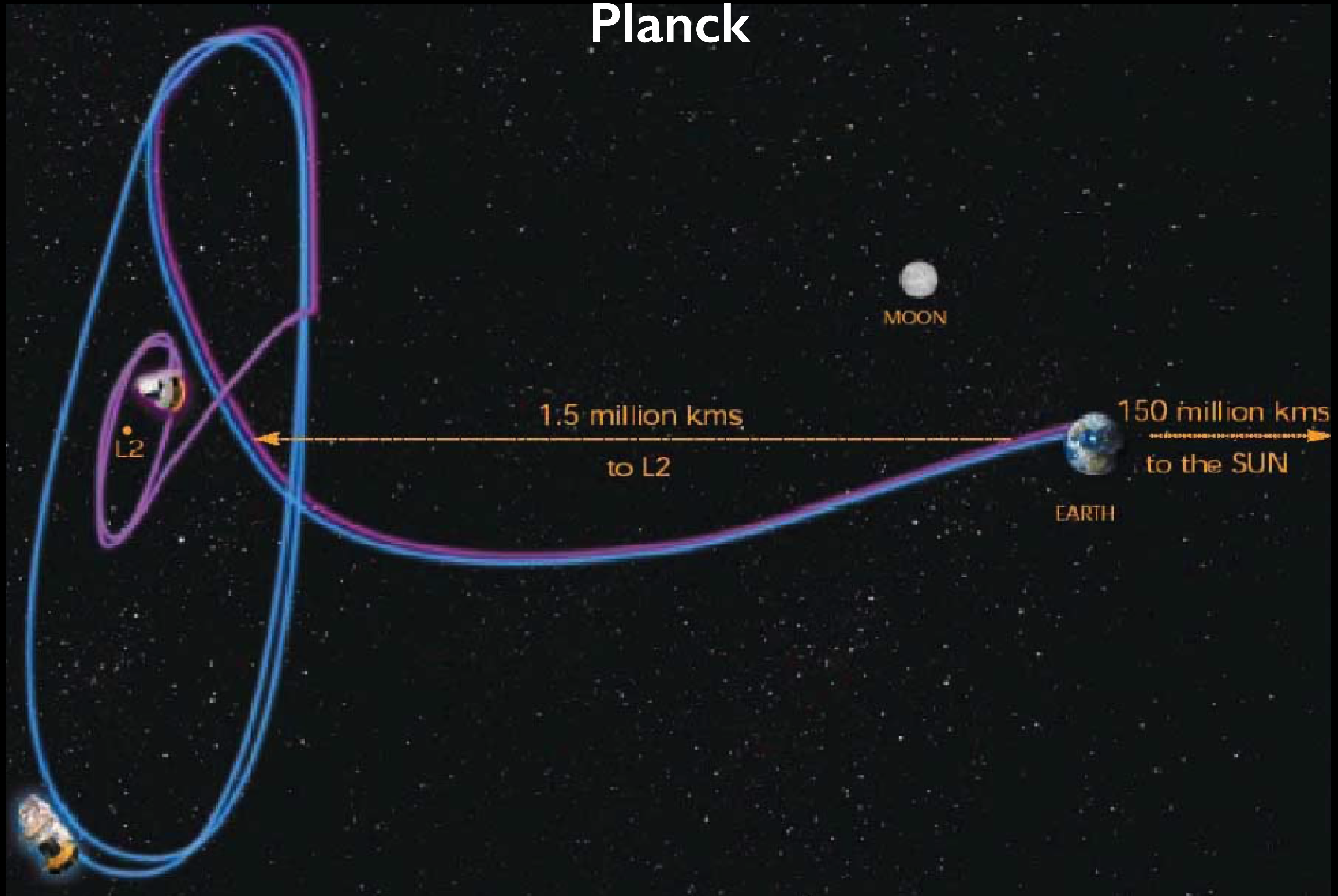
Planck



Planck



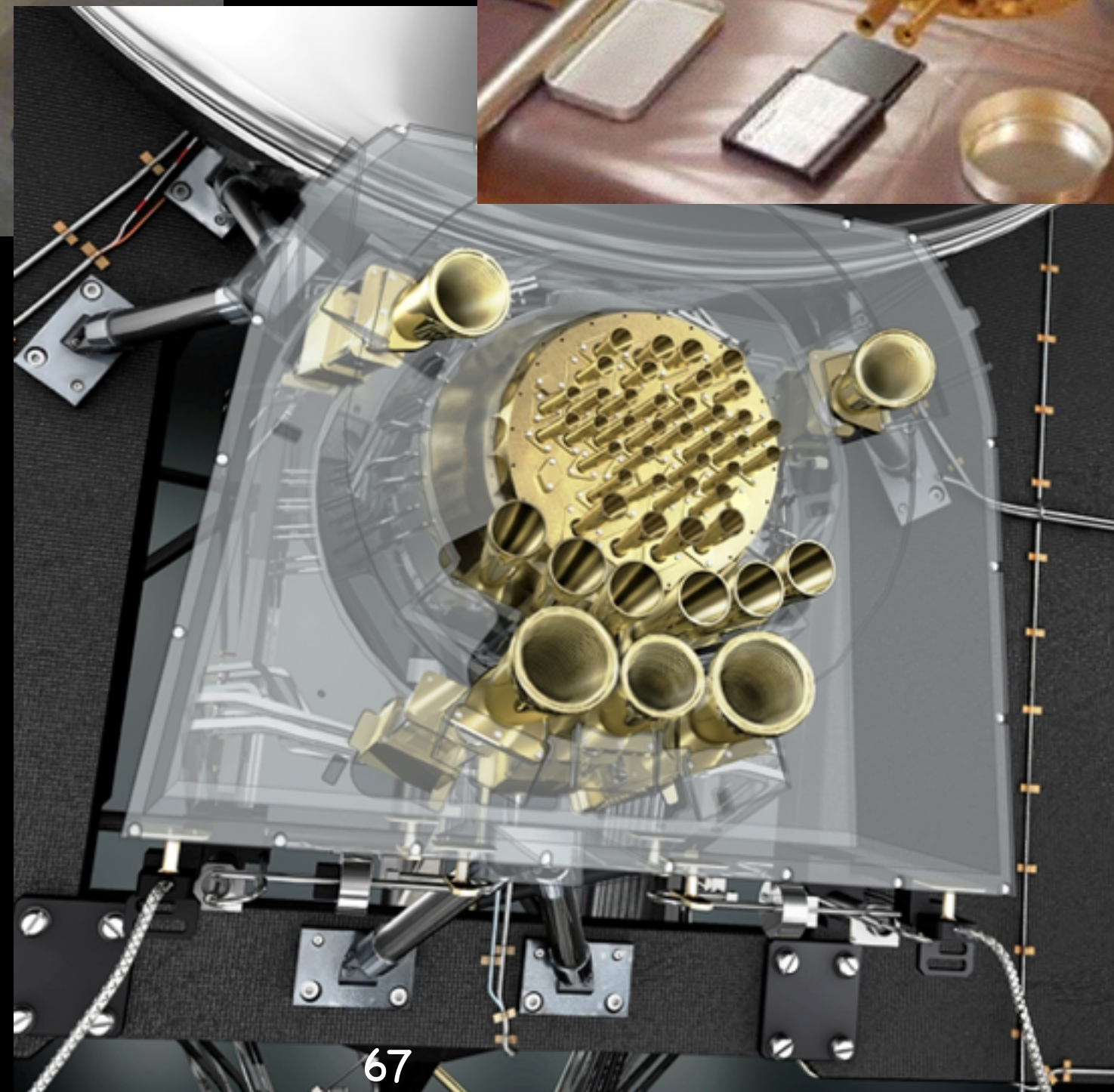
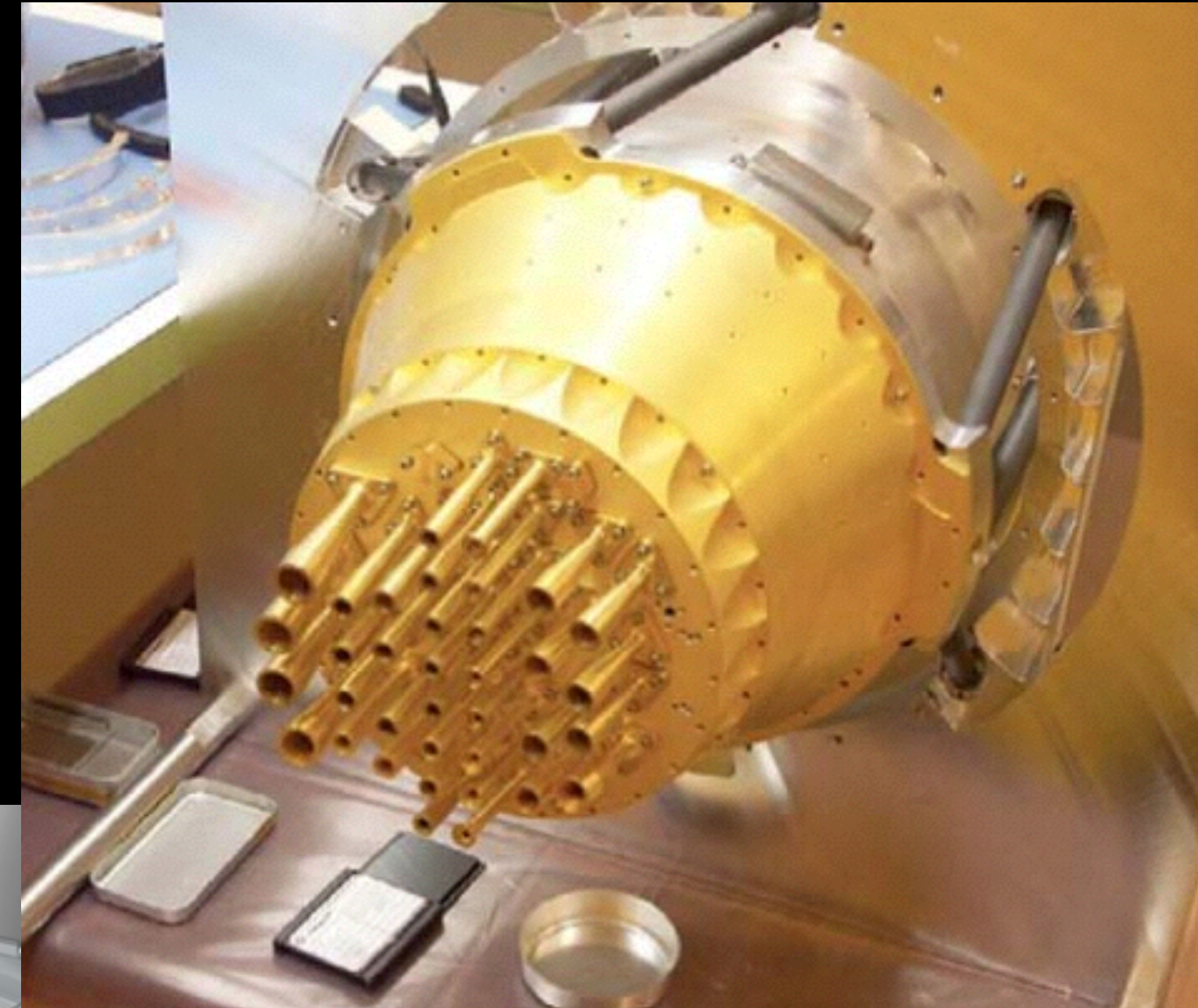
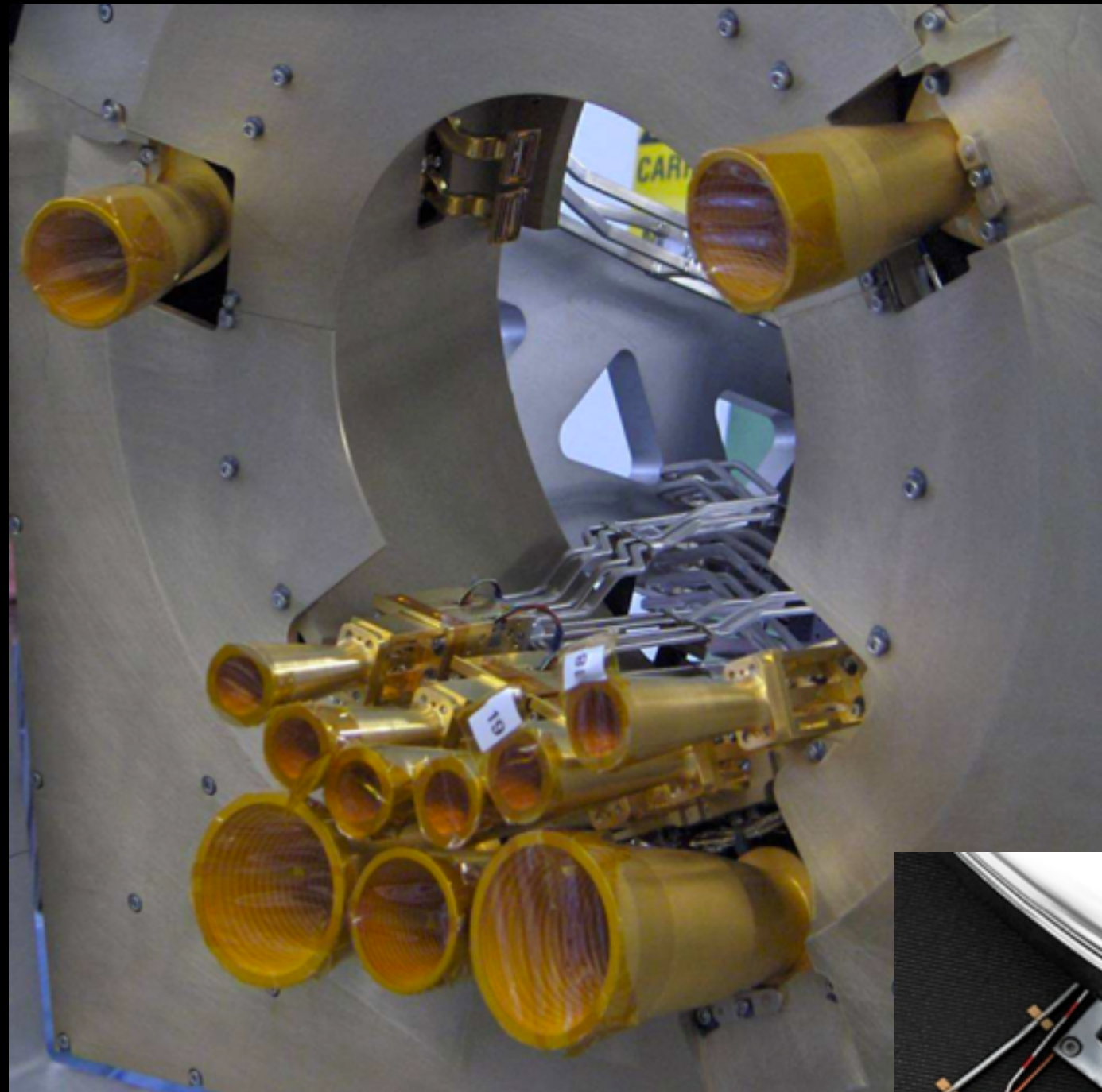
Planck

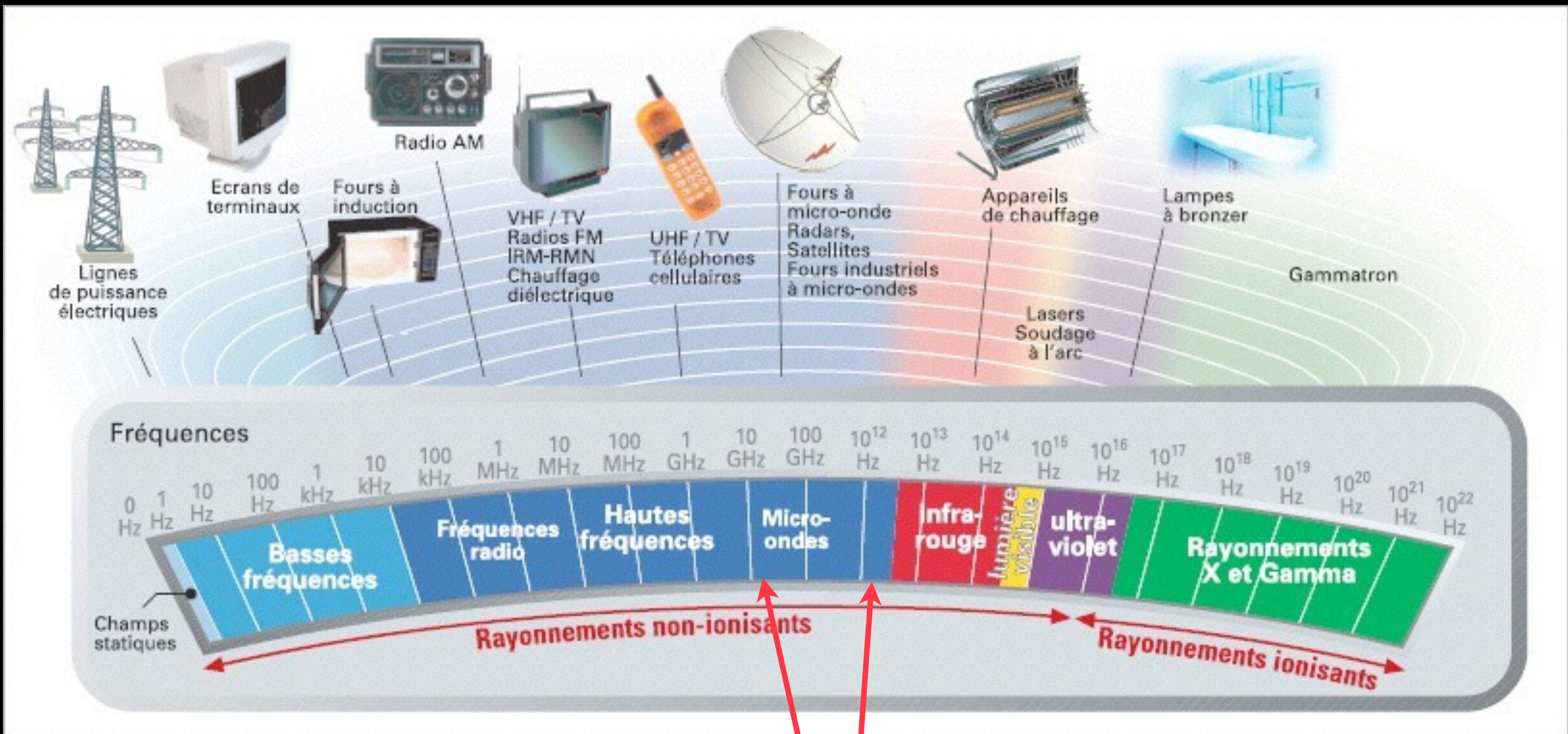


LFI 30-100 GHz

Planck

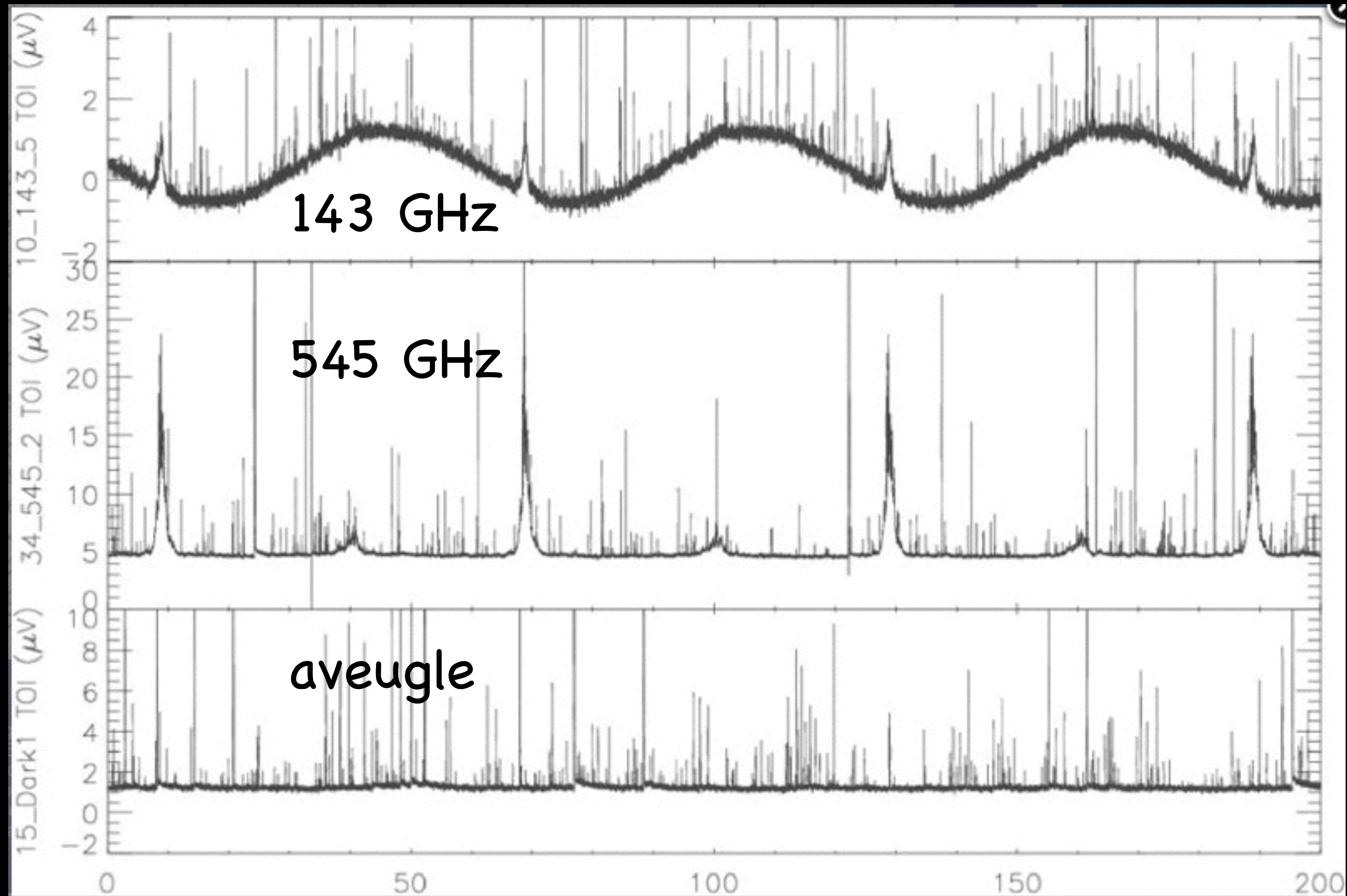
HFI 100-860 GHz



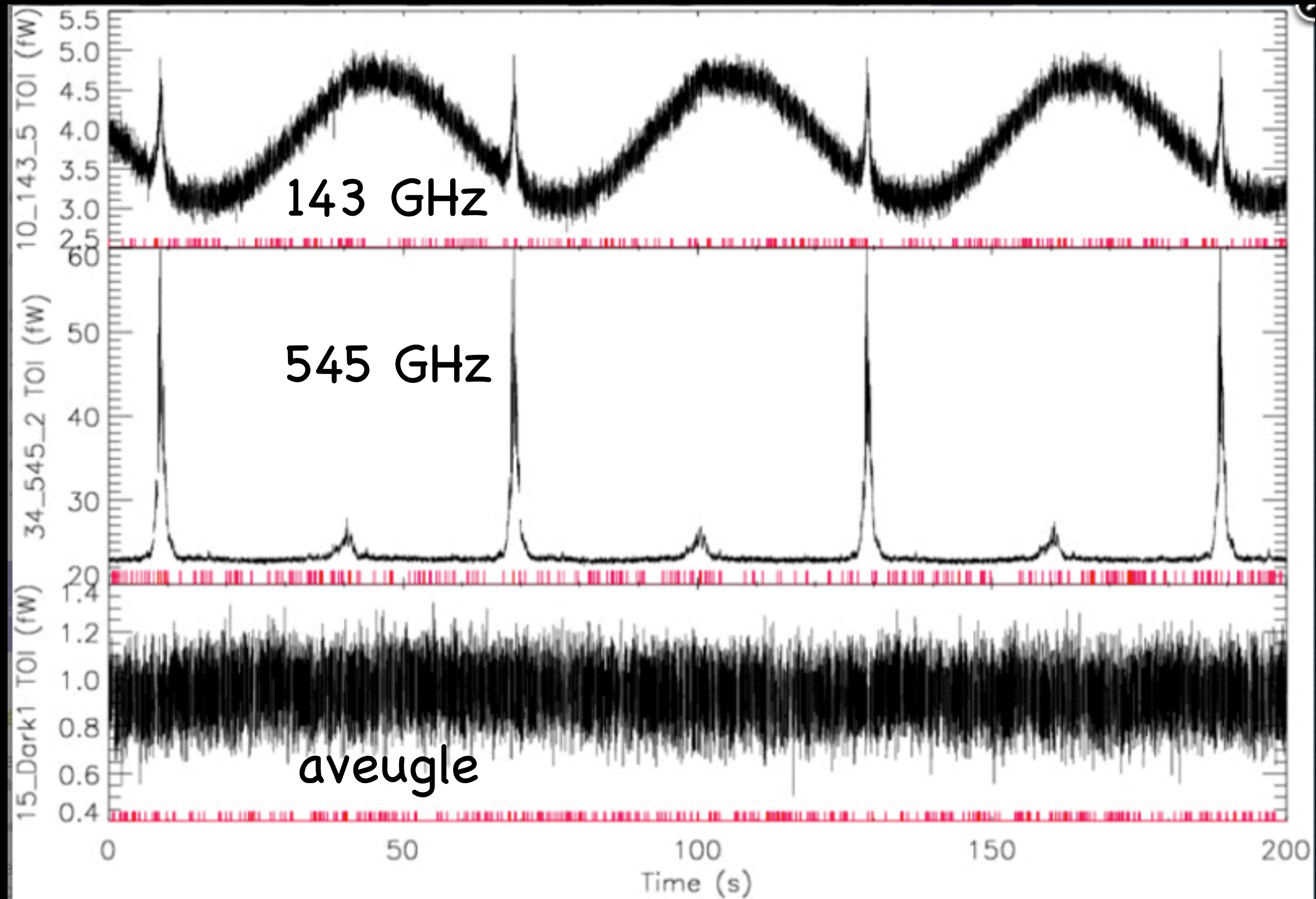


domaine de sensibilité de Planck

Planck



Planck



Dans la presse grand public

Mise à jour 05:24
LE FIGARO·fr

ACTUALITÉ | ECONOMIE | SPORT | CULTURE | LIFESTYLE | MADAME | Edition ABONNÉS

DIAPOS | INFOGRAPHIES | BLOGS | LE FIGARO TV

Newsletter | f | t | + | Rechercher

LE FLASH ACTU 14h19 Mort d'un scénariste des Simpsons

L'enfance de l'Univers vue par le satellite européen Planck

ACTUALITE > SCIENCES Par Tristan Vey | Mis à jour le 28/03/2013 à 05:23 | Publié le 21/03/2013 à 12:24

Le rayonnement fossile, sorte de lumière originelle émise 380.000 ans seulement après le big bang, a été isolé puis cartographié par l'Agence spatiale européenne avec une précision inégalée.

"All the News That's Fit to Print"

The New York Times

VOL. CLXII ... No. 56,083

FRIDAY, MARCH 22, 2013



The Cosmos, Back in the Day
An image from data recorded by a European Space Agency satellite shows a heat map of the universe as it appeared 370,000 years after the Big Bang. Page A10.

Libération

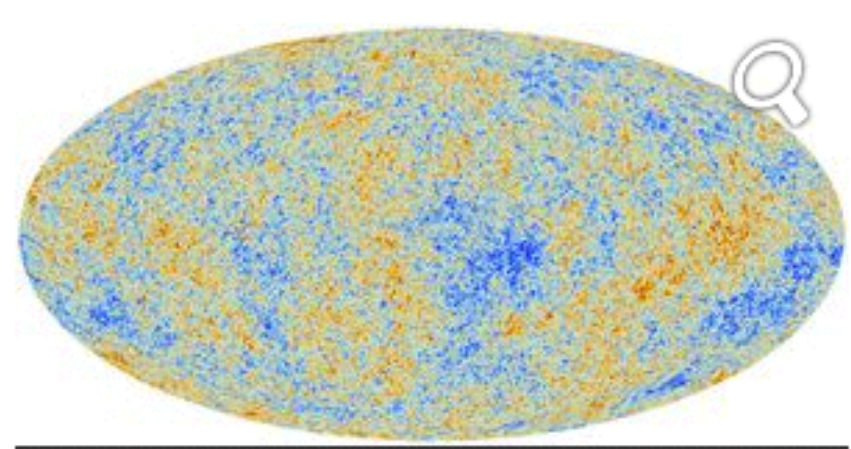
{SCIENCES²}

Par Sylvestre Huet
Journaliste à Libération

rechercher

À LIRE AUSSI

PLANCK RÉVÈLE LA CARTE DE L'UNIVERS

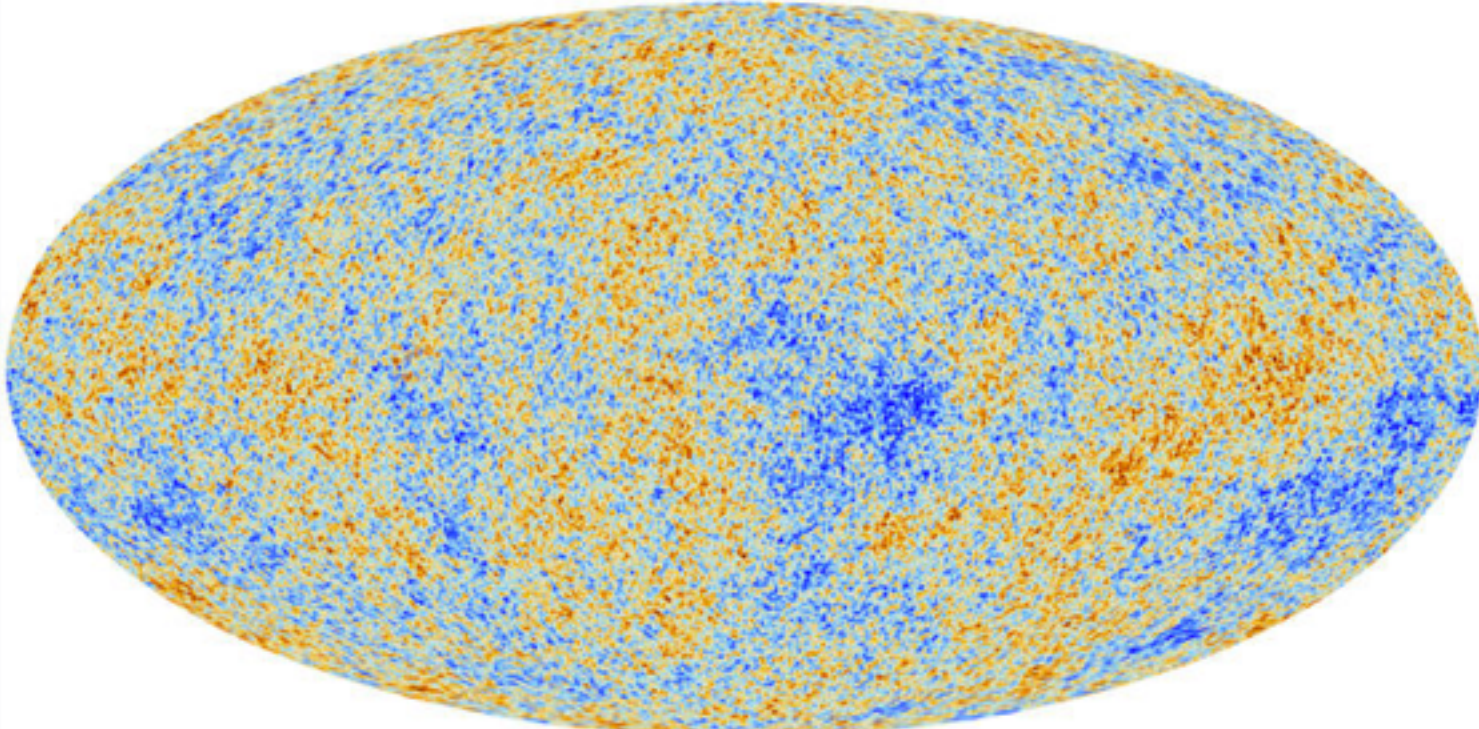


Carte sur tout le ciel du rayonnement cosmologique dressée par Planck.

Nous vivons dans un univers en expansion à une vitesse de **13 milliards et 819 millions** km/s/megaparsec, avec une précision de **67,9** km/s/megaparsec. Il s'agit d'une expansion majoritairement d'origine locale, qui, depuis cinq milliards d'années, a entraîné l'expansion. Il fera certainement grand encore, inobservé.

Ces chiffres sont impressionnants.

L'enfance de l'Univers dévoilée



Le satellite européen Planck livre des images inédites du cosmos, 380 000 ans après le Big Bang. Ni étoile, ni galaxie, mais des particules microscopiques, des électrons et des protons.

- Des astronomes pensent assister à la naissance de la vie.
- En Russie, des scientifiques récupèrent les données de la mission Planck.

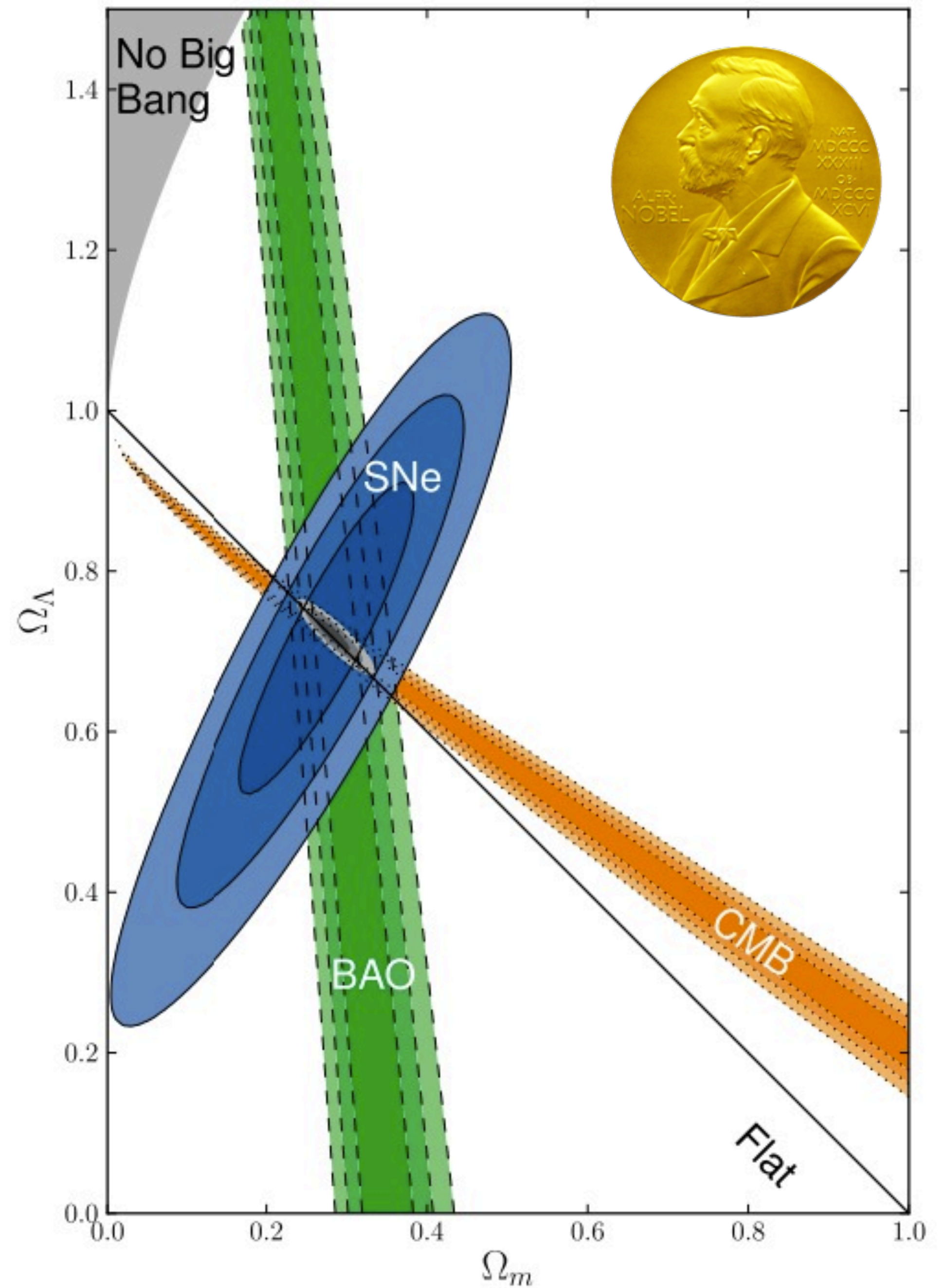
L'actualité en continu

- 16:06 "Manif pour tous", la grande illusion
- 16:05 Logement : "Une première étape"
- 15:55 Suntech : Icare avait pris de l'EPO
- 15:50 L'Écosse indépendante en 2014 ?
- 15:48 En vedette américaine
- 14:55 L'Iran "réduira en poussière" Tel-Aviv
- 14:45 L'ONU enquête sur les armes chimiques
- 14:42 Rassemblement pour la trêve du PKK

Les plus partagés

- 1 Un rat pourrait avoir causé la grave panne d'électricité à Fukushima
- 2 Des mariages à la sauce Star Wars ?

Concordance
cosmique !
très joli mais...



Résumé

Si la relativité générale est la bonne théorie de la gravitation (sachant que ce n'est pas le cas !) et si le principe cosmologique est vérifié

ALORS :

85% de la matière dans l'univers est inconnue (matière noire)

69% de la densité d'énergie dans l'univers est inconnue (énergie noire)

l'univers devrait finir en "Big Rip" (expansion infinie et accélérée)

