



**Aperçu du modèle standard
de la cosmologie**

Benoît REVENU, SUBATECH, Nantes

Vocabulaire (Larousse 2006)

Astronomie

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

Astrophysique

“Partie de l'astronomie qui étudie les propriétés physiques, la formation et l'évolution des astres.”

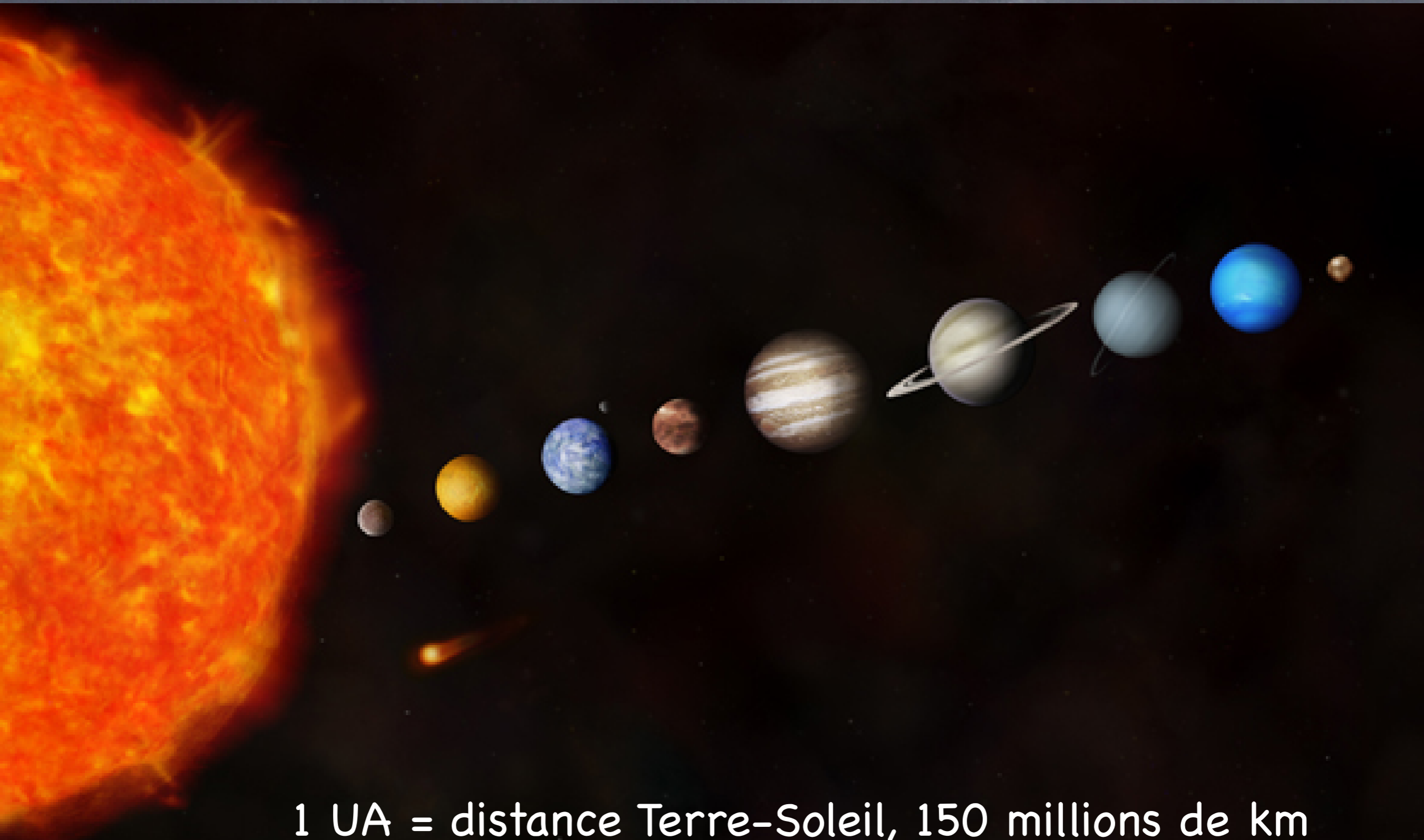
Cosmologie

“Science qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers considéré dans son ensemble.”

Plan (tentative)

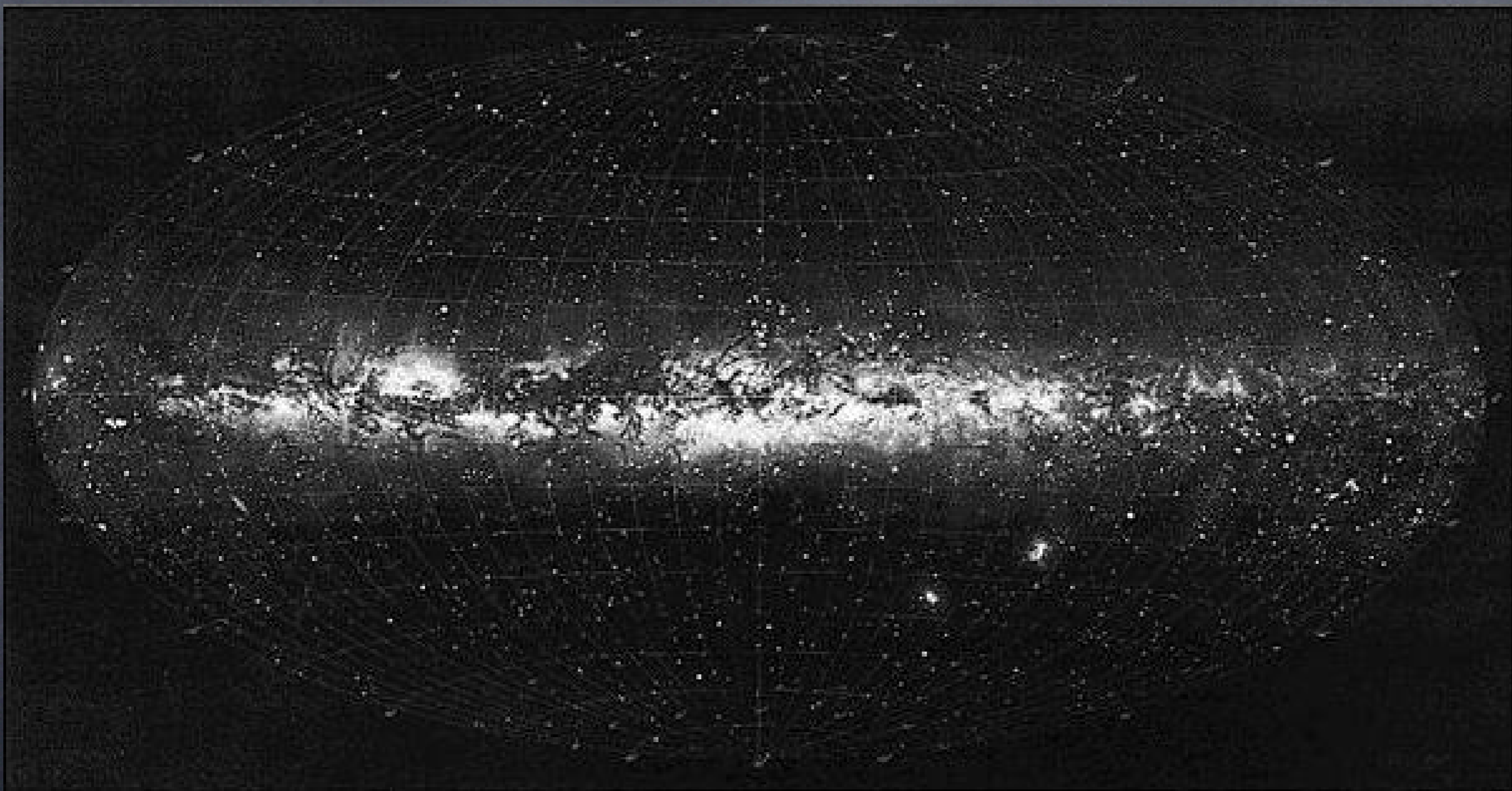
- considérations générales de physique
- quelques propriétés d'un modèle d'Univers décrit par la relativité générale et le principe cosmologique
- de la matière dans l'Univers
- le rayonnement fossile
- la mission Planck

un parsec vaut $3,085\ 677 \times 10^{16}$ m, soit environ 3,261 564 années-lumière.

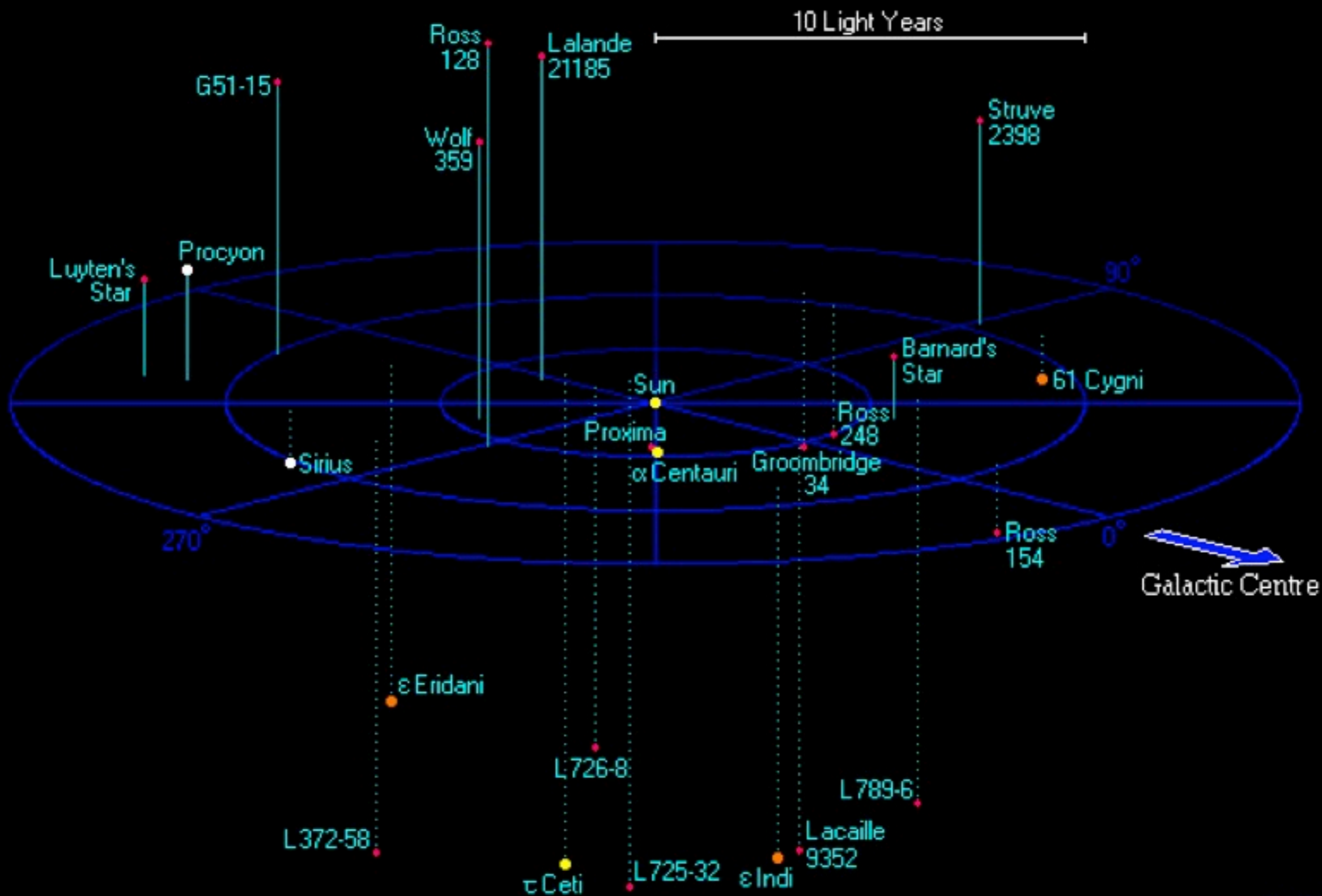


1 UA = distance Terre-Soleil, 150 millions de km
Système solaire : quelques heures-lumière

étoile la plus proche : 1.3 pc = 4.22 al

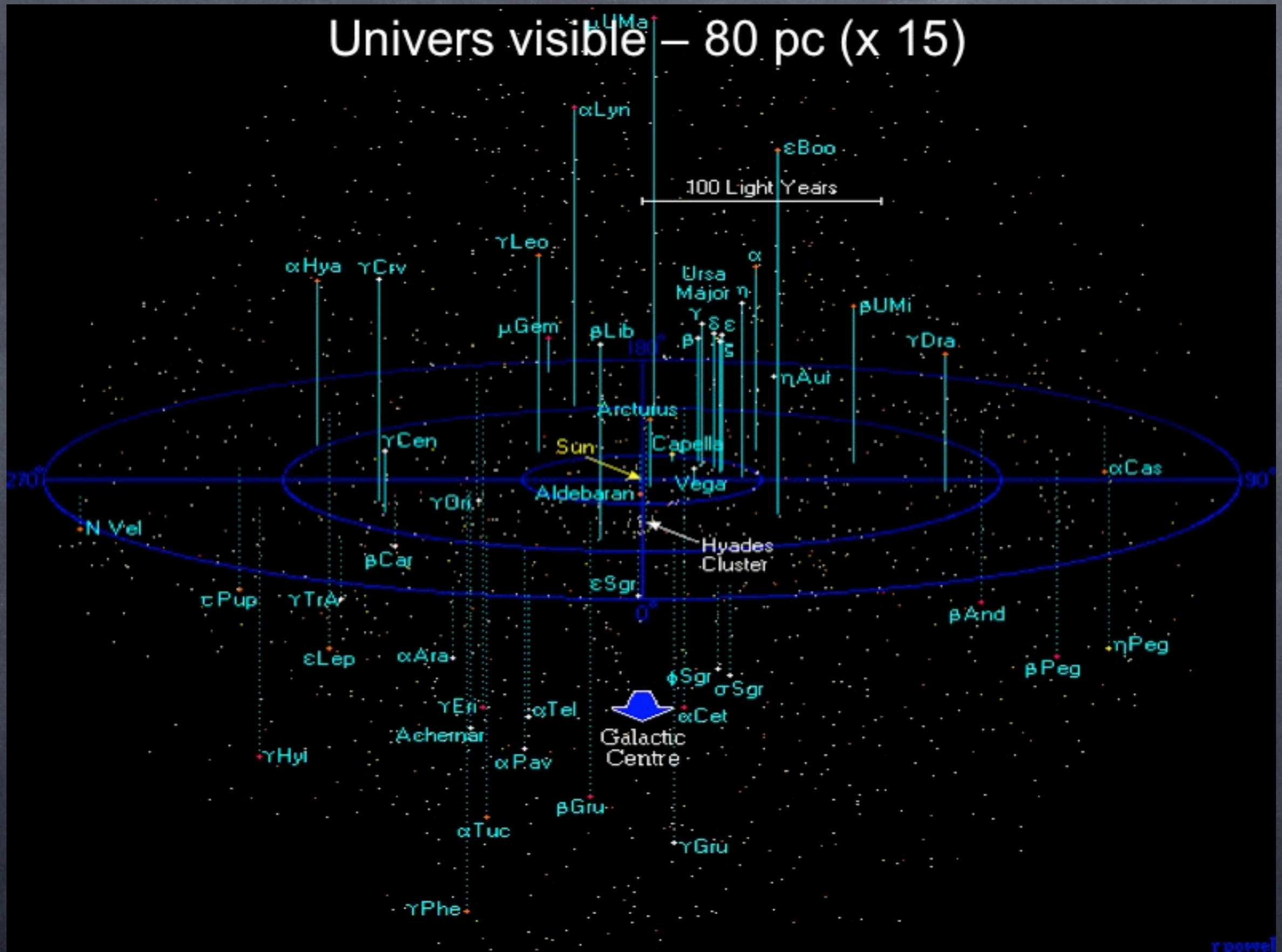


Universers visible – 5 pc



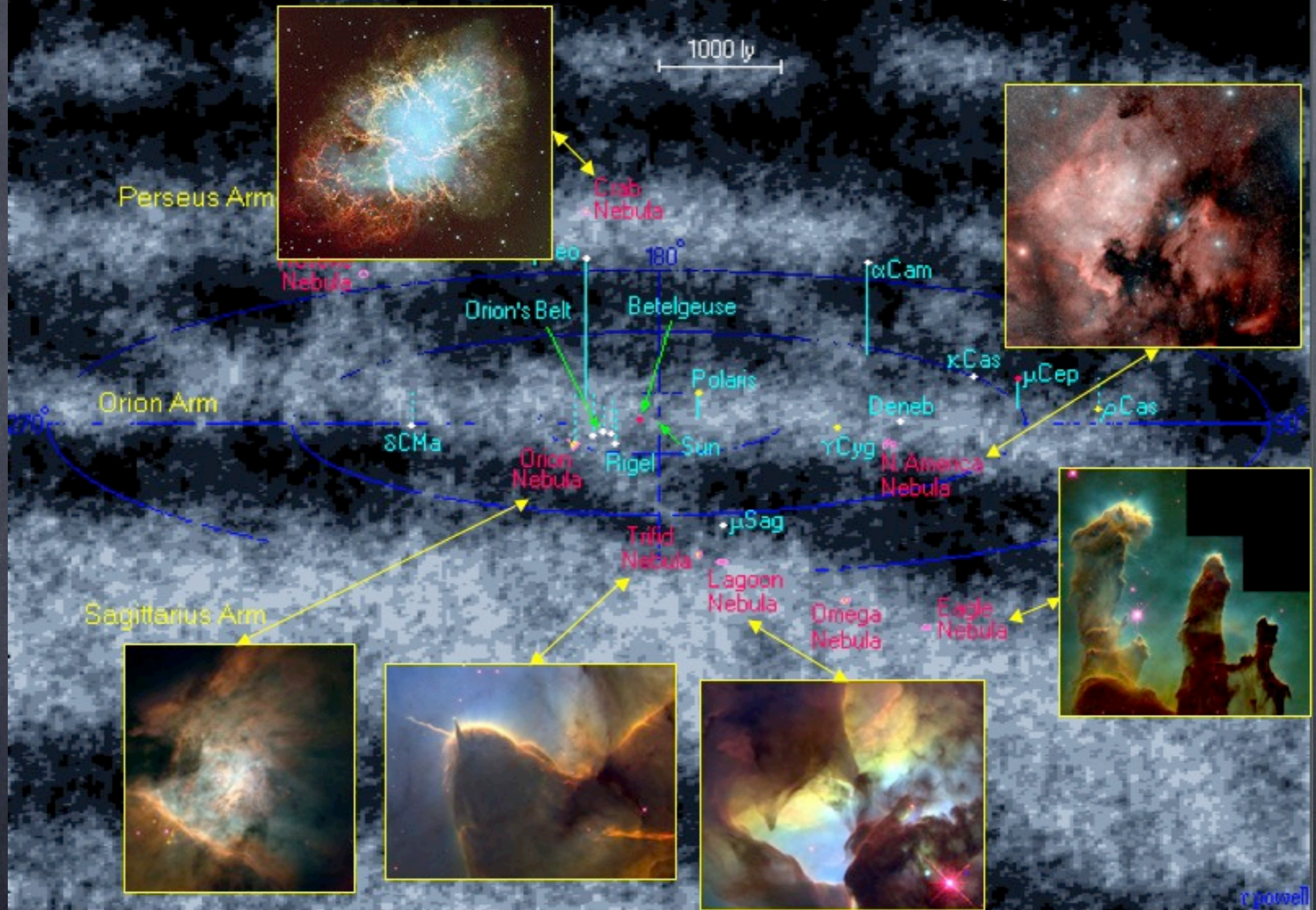
rpowell

Universes visible – 80 pc (x 15)

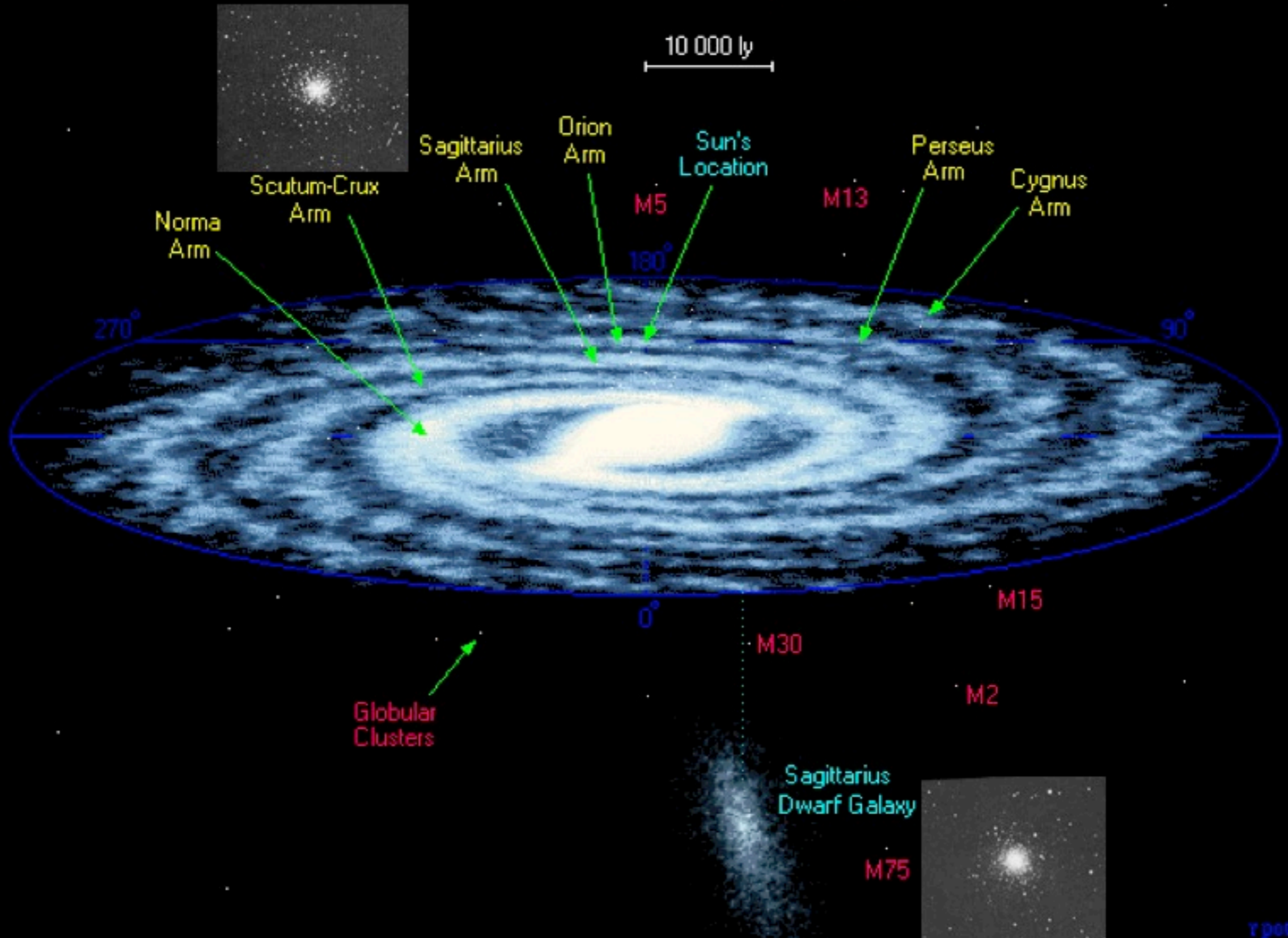


r porrel

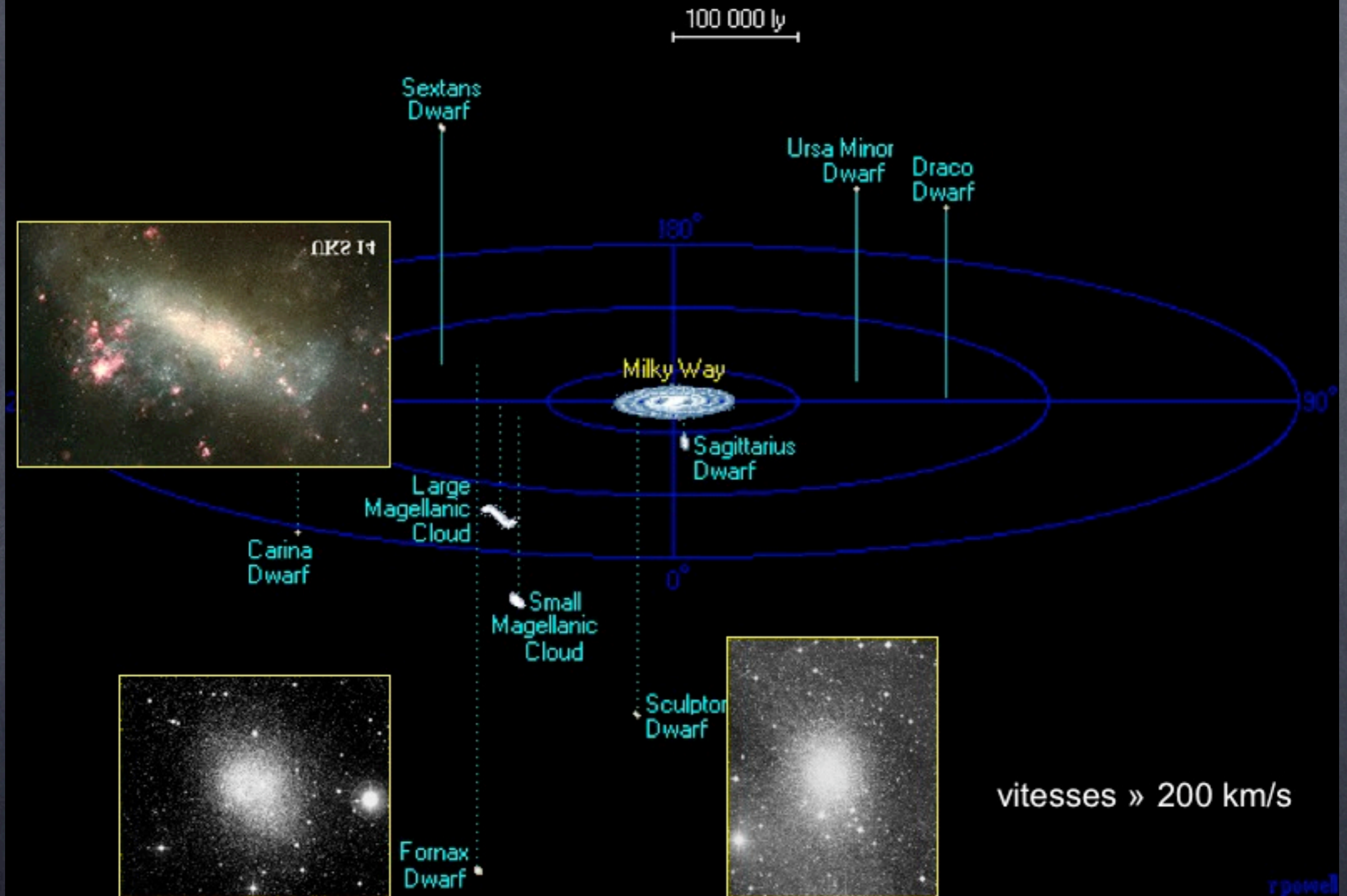
Univers visible – 1500 pc (x 20)



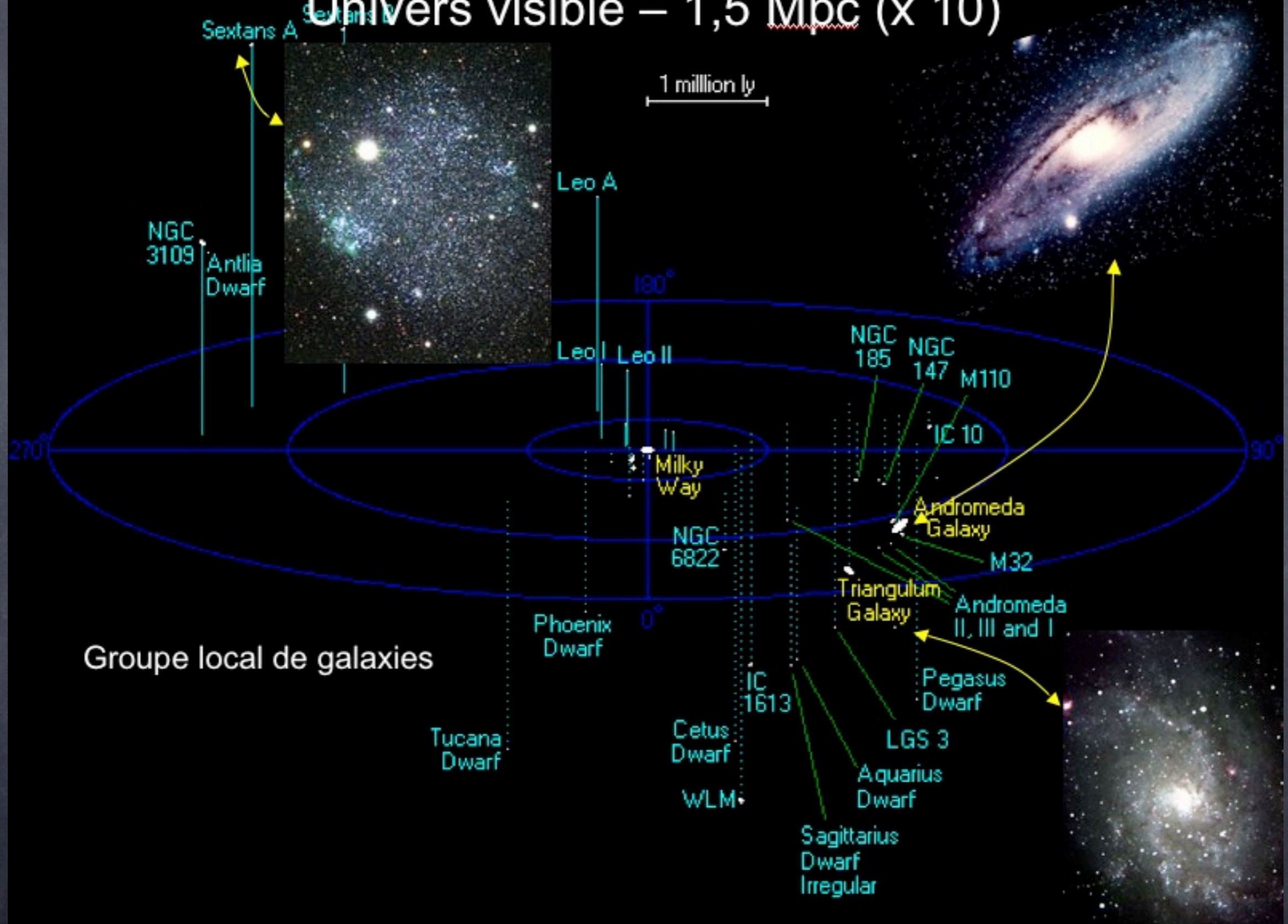
Univers visible – 15 kpc (x 10)



Univers visible – 150 kpc (x 10)

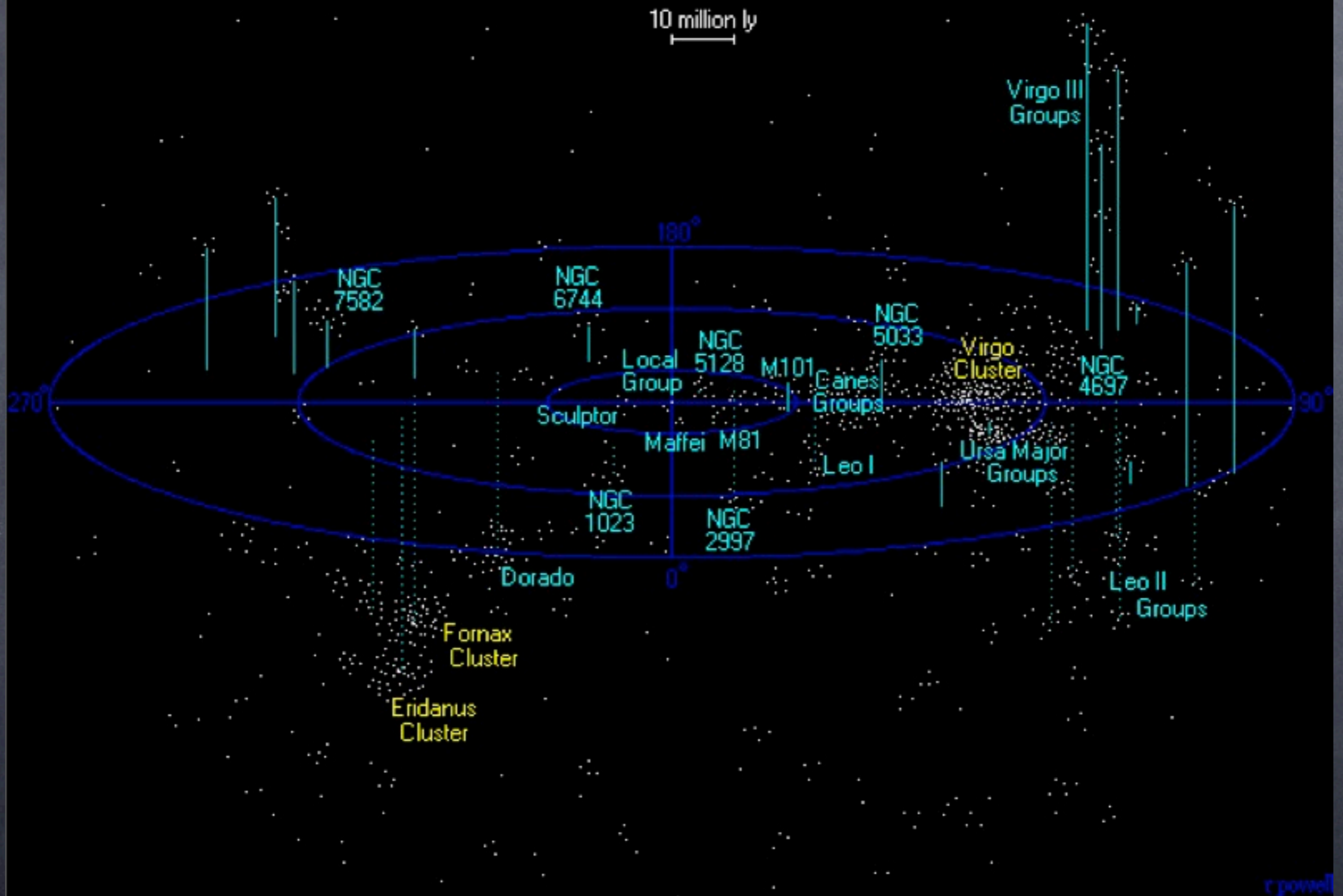


Univers visible – 1,5 Mpc (x 10)



1 Mpc = 3.1×10^{24} cm = 1/1000 de l'univers observable


Universals visible – 30 Mpc (x 20)



Amas de galaxies

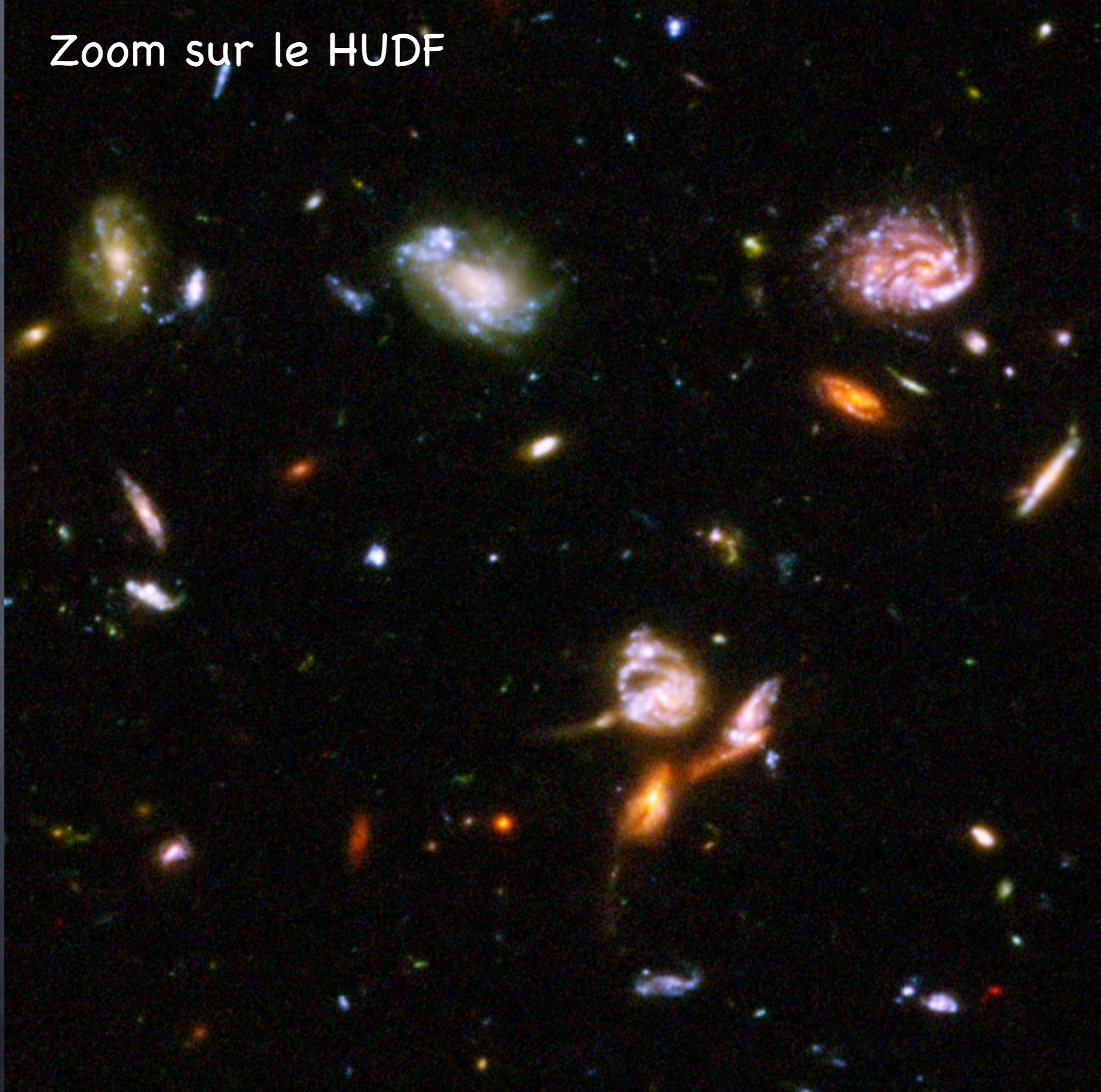


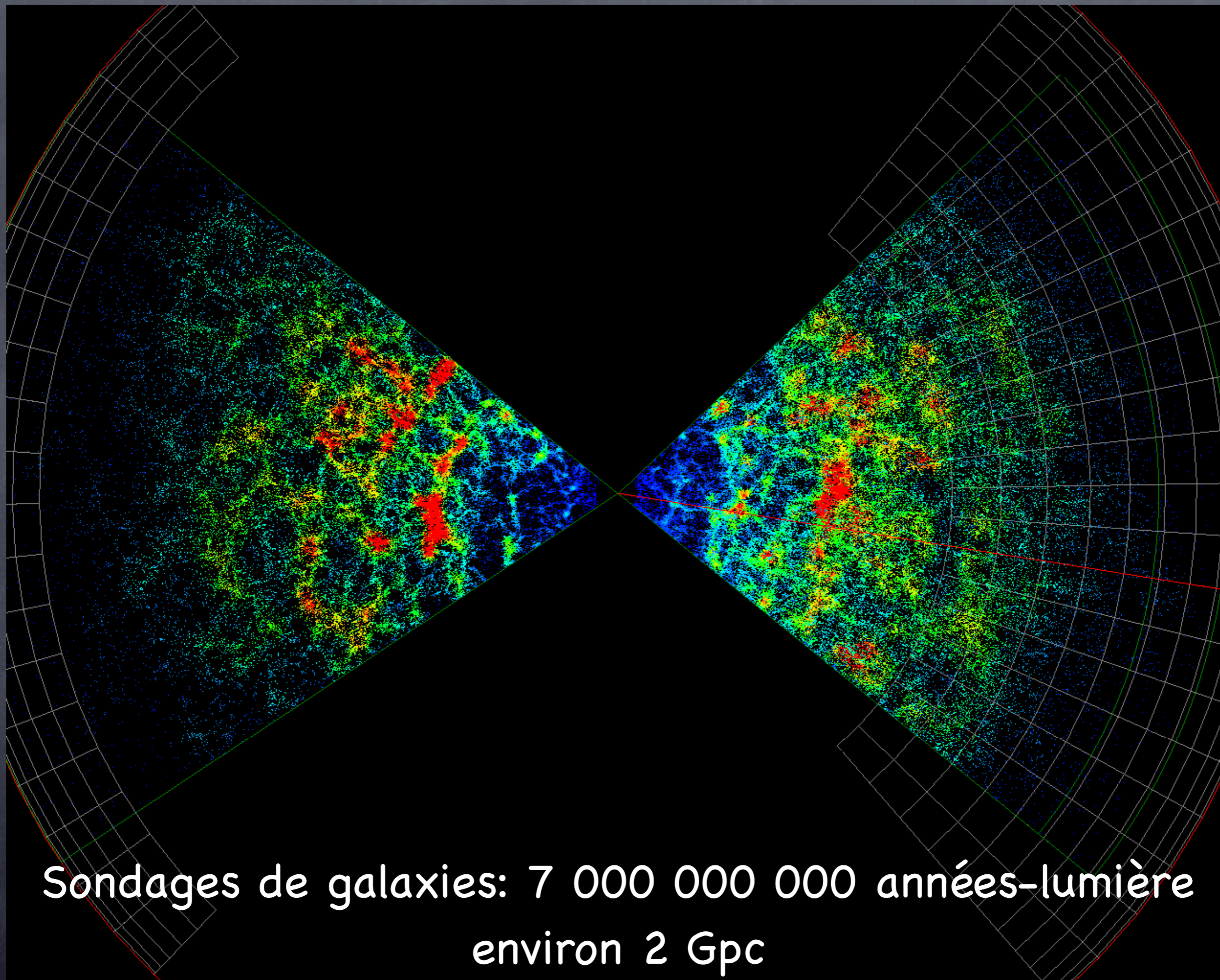
masse = 10^{15} masses solaires, entre 100 et 1000 galaxies

A vast field of galaxies, including spirals, ellipticals, and irregular shapes, scattered across a dark background. Some galaxies are bright and clear, while others are faint and distant. The colors range from yellow and orange to blue and purple.

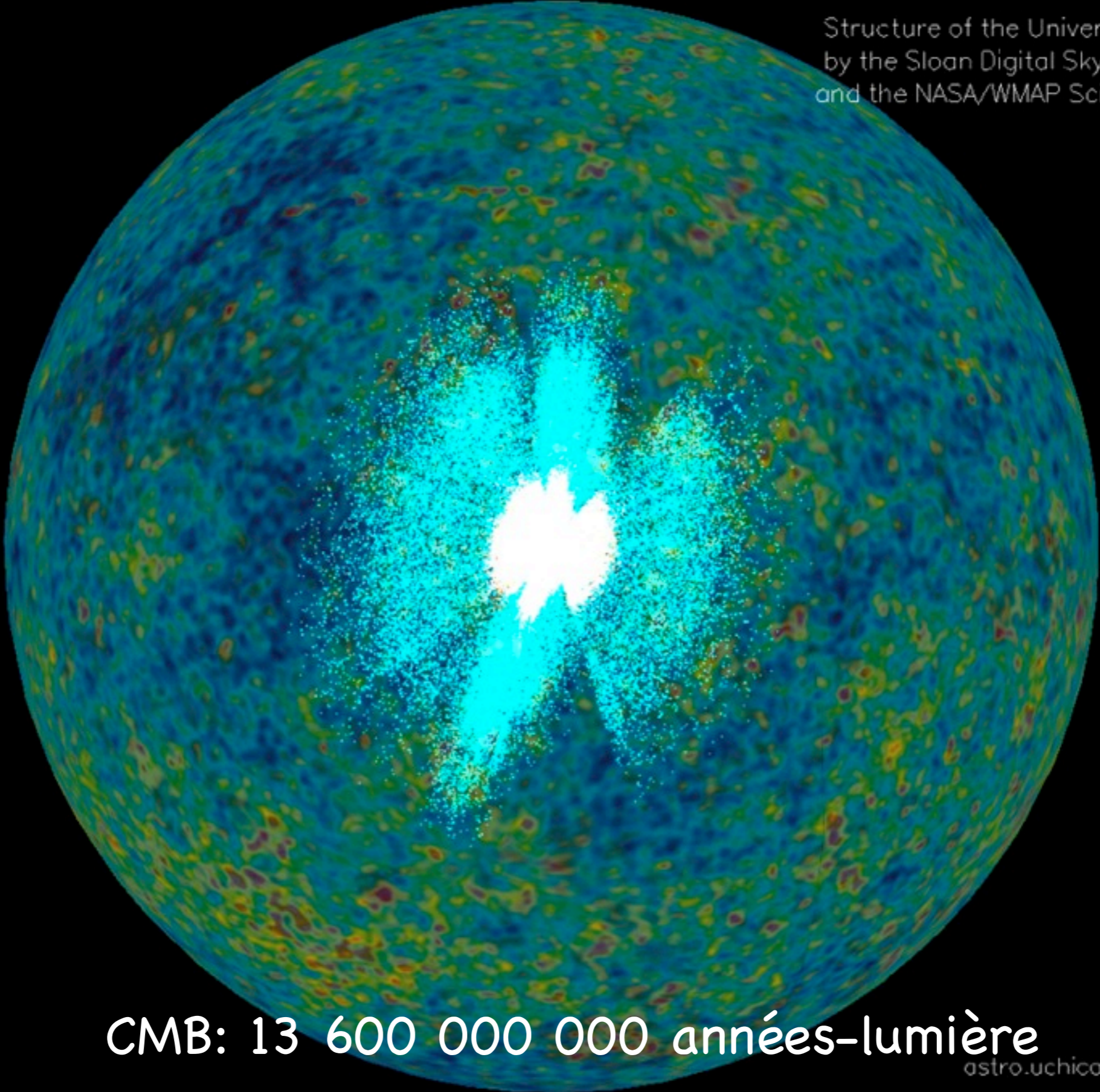
Hubble ultra deep field
11 arcmin² (1/10 du
diamètre de la lune)
10⁴ galaxies
11.3 jours de pause !

Zoom sur le HUDF





Structure of the Universe as found
by the Sloan Digital Sky Survey
and the NASA/WMAP Science Team



CMB: 13 600 000 000 années-lumière



astro.uchicago.edu/cosmus

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 1979	photon 1923	W^+, W^-, Z^0 1983	graviton

à découvrir !

Les forces dans la nature

résumé

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

portée

à découvrir !

Les forces dans la nature

résumé

interaction	forte	électro- magnétique	faible	gravitation
intensité relative		10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}
portée (m)	10^{-15}	10^8	10^{-18}	∞
médiateur	gluon 1979	photon 1923	W^+, W^-, Z^0 1983	graviton

Diagram annotations:

- A blue box labeled "portée" (range) is connected by lines to the "forte" and "électro-magnétique" columns.
- A blue box labeled "écran" (shielding) is connected by lines to the "électro-magnétique" and "faible" columns.
- The "graviton" cell in the "médiateur" row is circled in red.

à découvrir !

Les forces dans la nature

résumé

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

à découvrir !

Les forces dans la nature

résumé

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

cosmologie = théorie de la gravitation à découvrir !

Cas particulier de la gravitation

Cas particulier de la gravitation

Loi de Newton (XVII^{ème} siècle) :

$$\mathbf{F} = m_i \mathbf{a}$$

force agissant
sur l'objet

masse **inertielle**
de l'objet

accélération acquise
suite à l'action
de la force

Cas particulier de la gravitation

Loi de Newton (XVII^{ème} siècle) :

$$F \equiv m_i a$$

force agissant
sur l'objet

masse **inertielle**
de l'objet

accélération acquise
suite à l'action
de la force

Force de
gravitation :

$$F \equiv m_G g$$

masse **gravitationnelle**
de l'objet

champ de pesanteur
créé par les masses
voisines

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 !

Cas particulier de la gravitation

On obtient donc :

$$m_G g = m_i a$$

or $m_G = m_i$

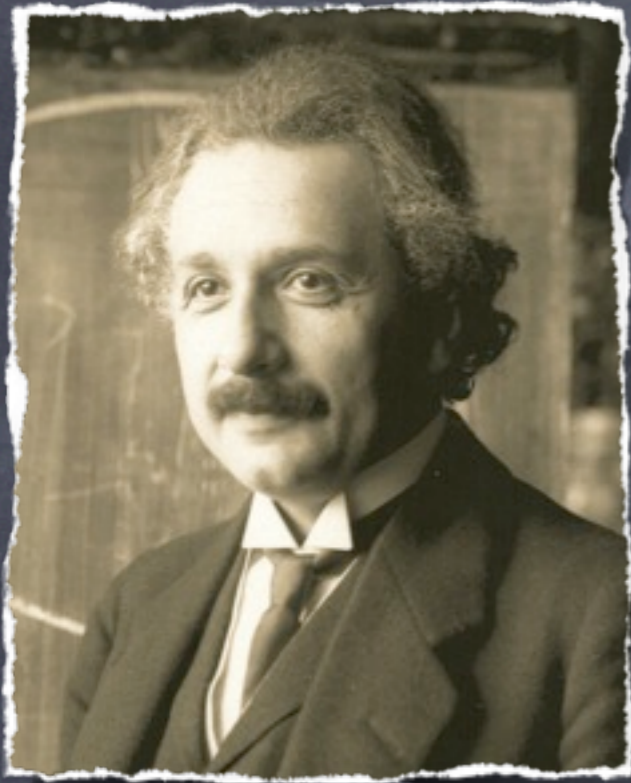
c'est le principe d'équivalence

$$g = a$$

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



$$g \equiv a$$



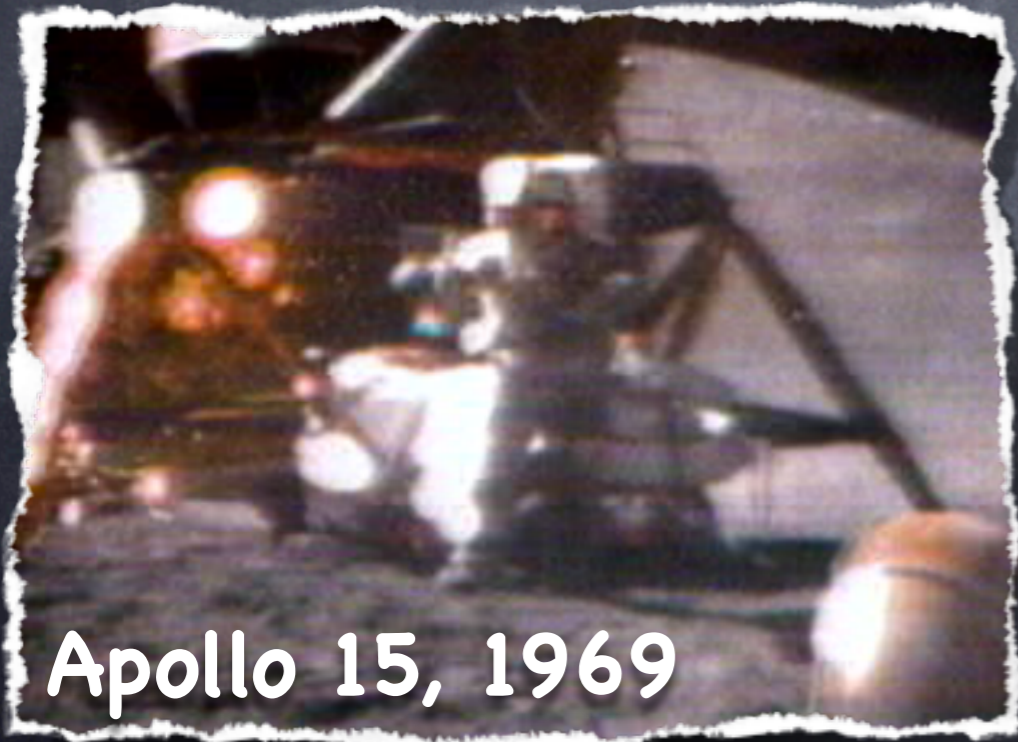
La gravitation **disparaît** par un choix de repère approprié "en chute libre"

+

relativité restreinte (1905)

=

relativité générale (1915)



Apollo 15, 1969

Relativité générale

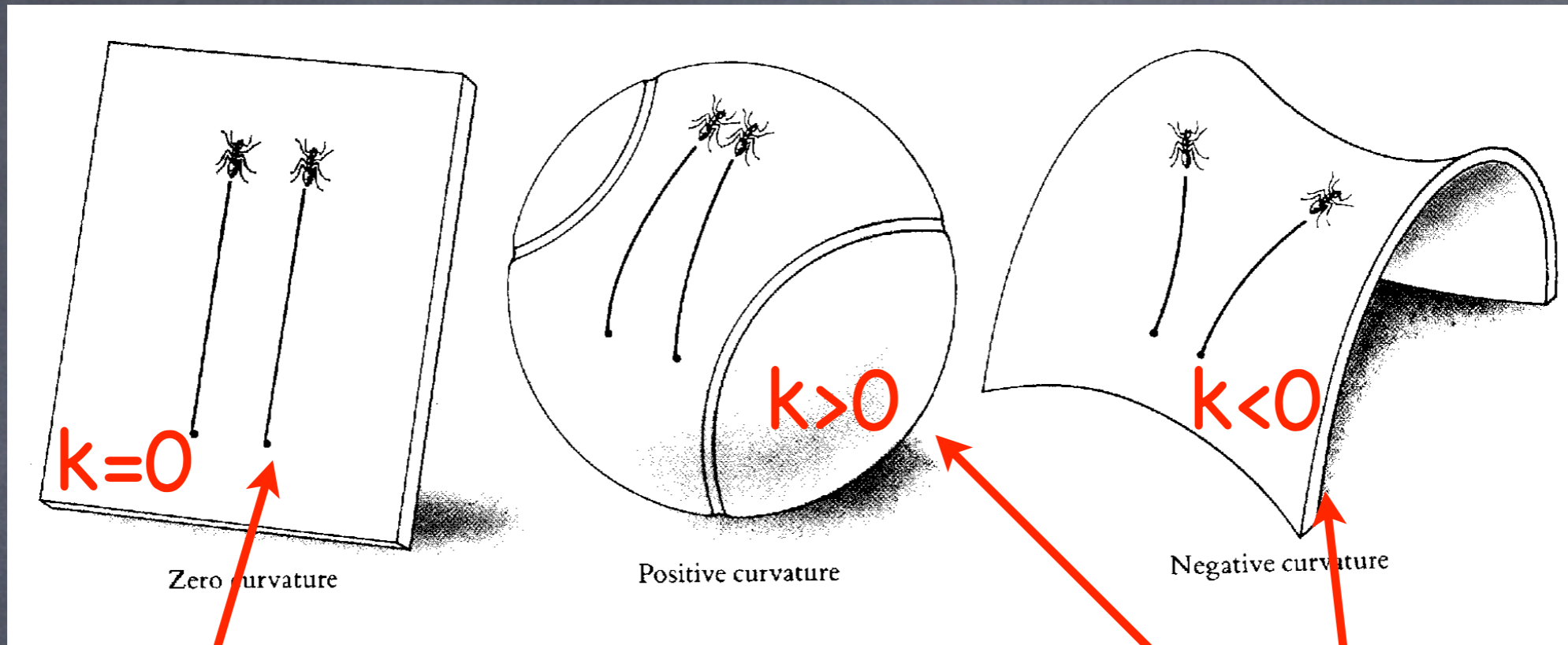
- tous les objets chutent de la même façon
- ne plus considérer la gravitation comme une force extérieure mais en l'intégrant à l'espace-temps
- dès lors, on a

gravitation = courbure de l'espace-temps

- la masse est la source de la courbe

Prix à payer : géométrie non euclidienne

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

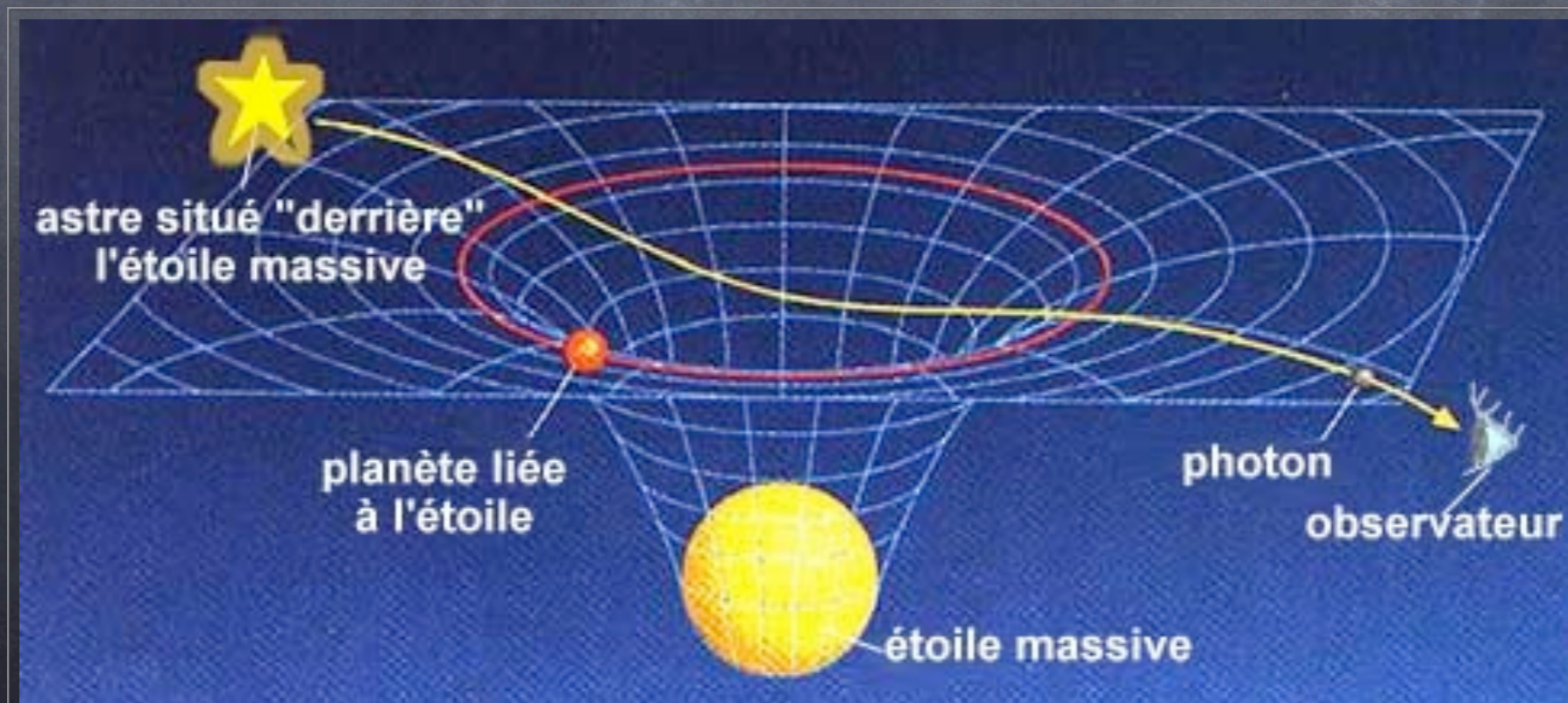
+

constante
cosmologique

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



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

Tout ceci sans aucune hypothèse simplificatrice. Cette théorie n'a jamais été mise en défaut jusque là (confirmée dès 1919).

Pour aller plus loin : le principe cosmologique



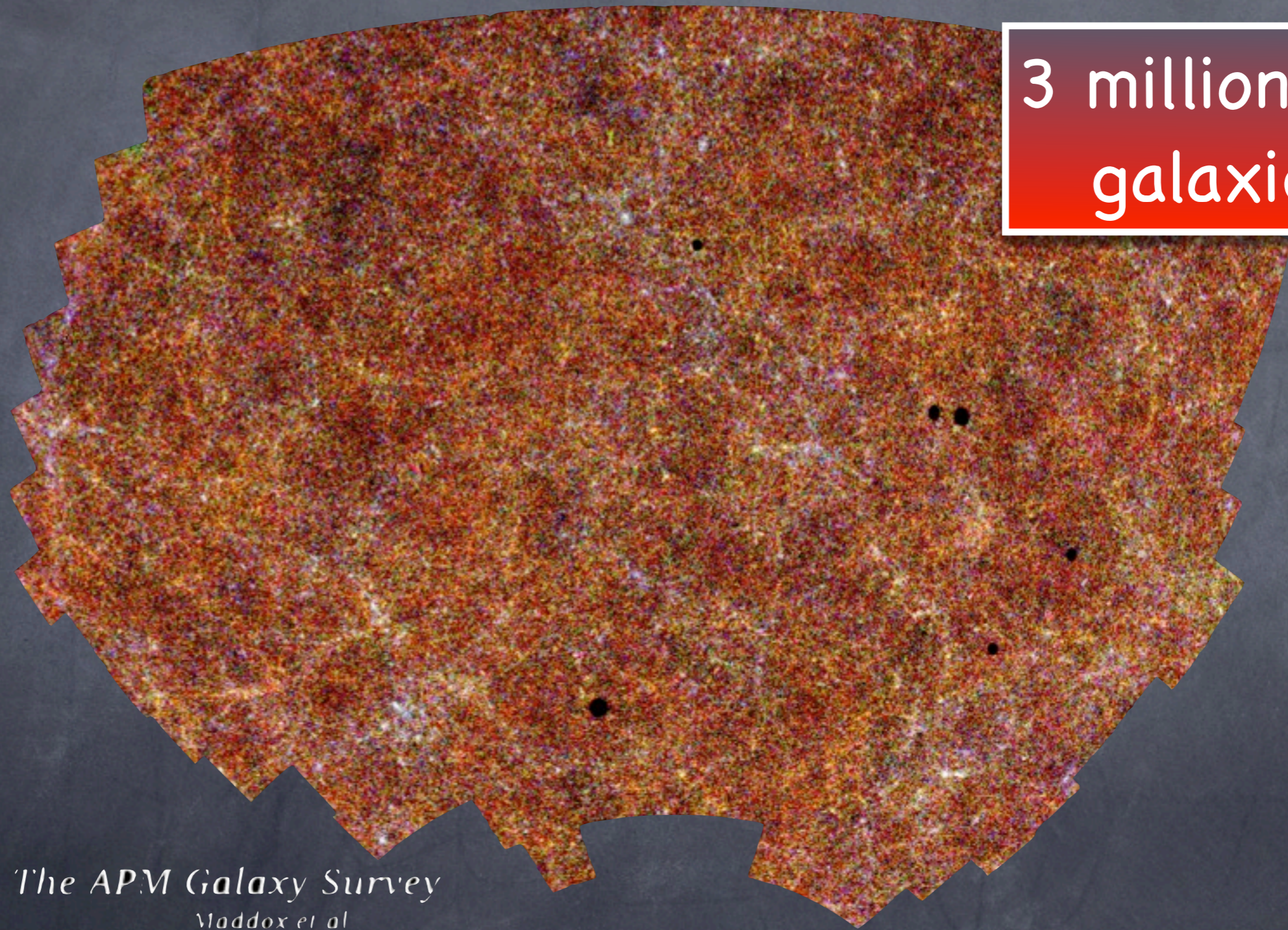
Copernic : la Terre n'est pas au centre du système solaire

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**

Homogénéité et isotropie

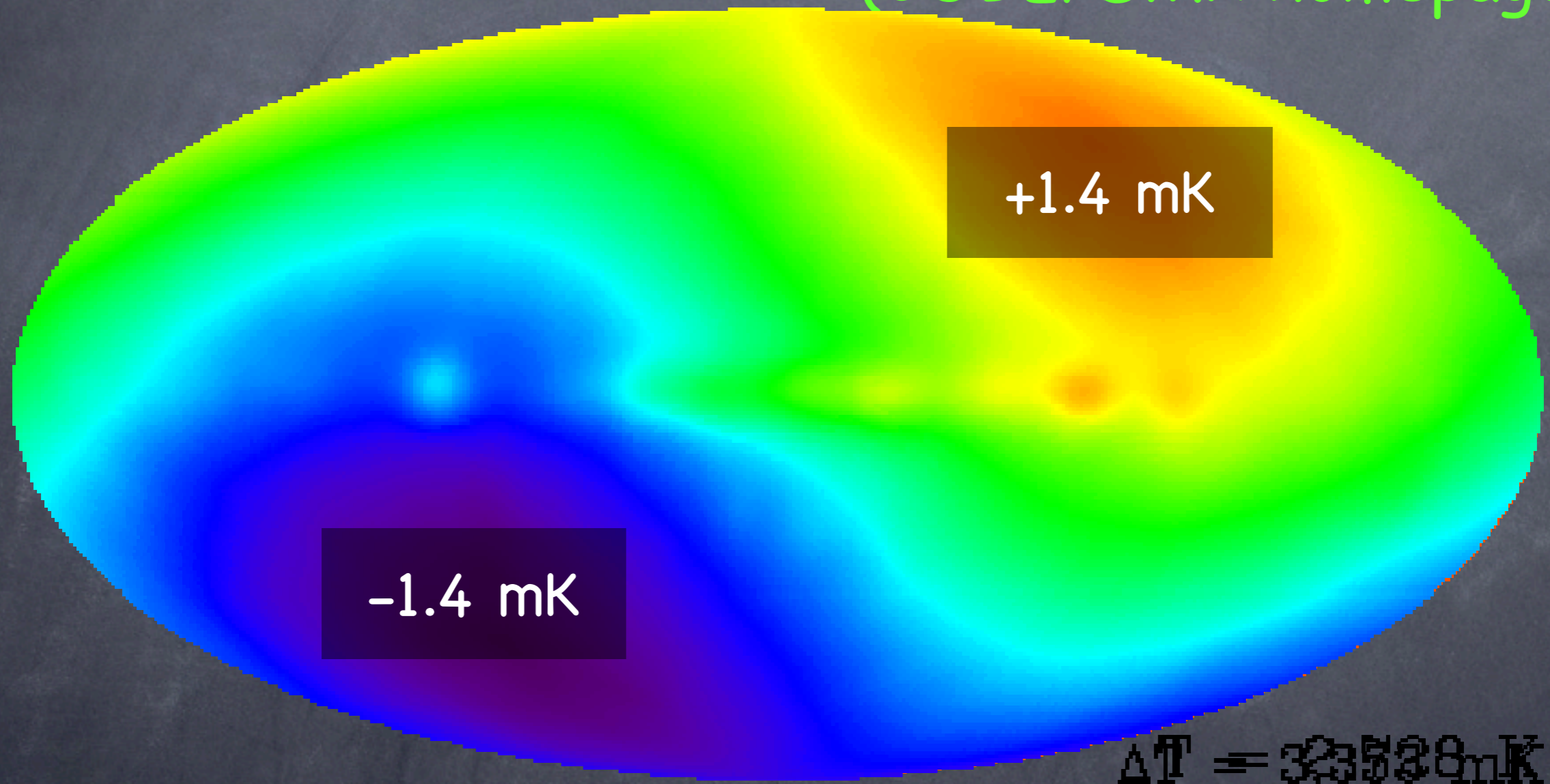
(COBE/DMR homepage)



$T = 2.728 \text{ K}$

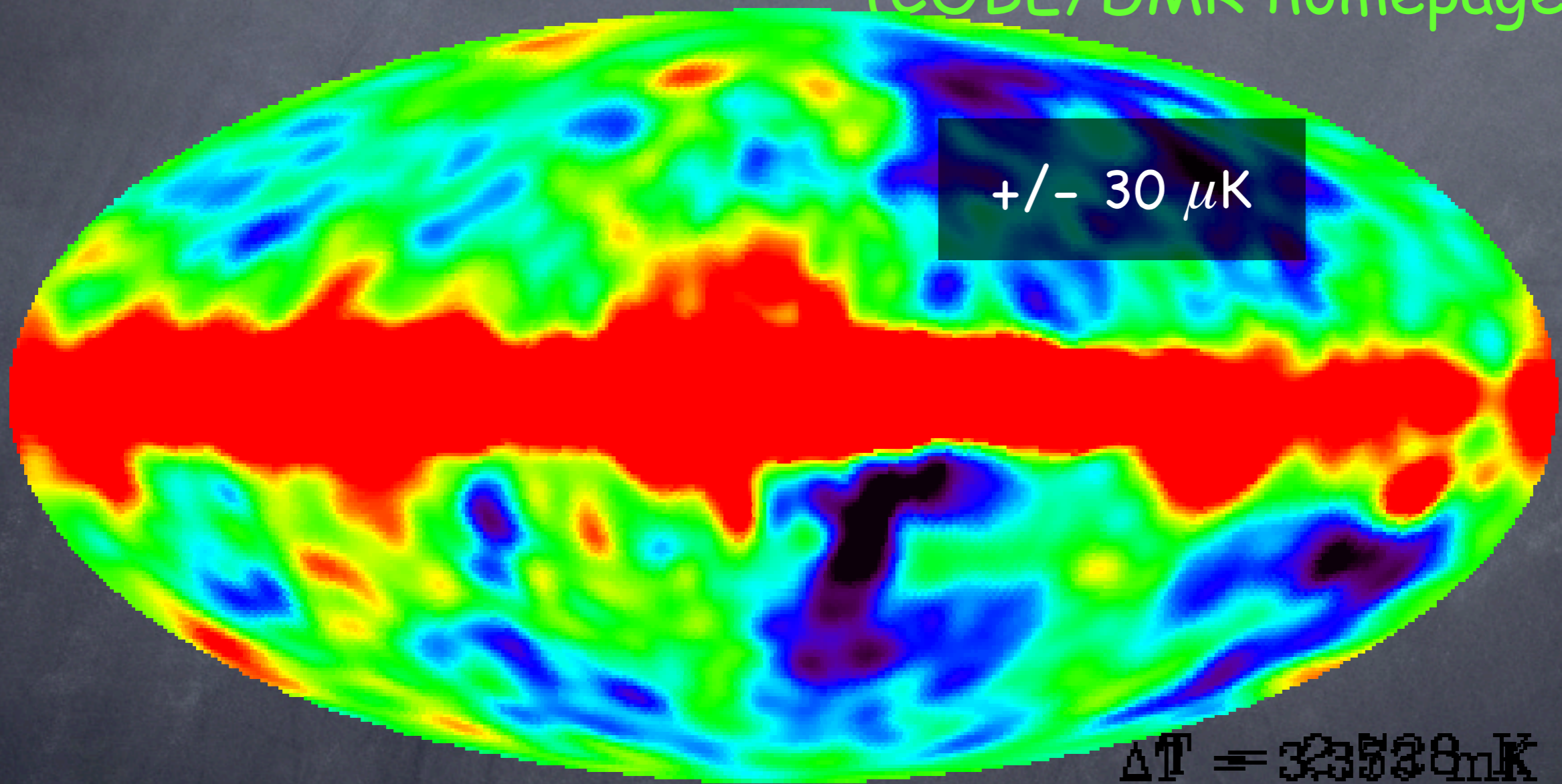
Homogénéité et isotropie

(COBE/DMR homepage)



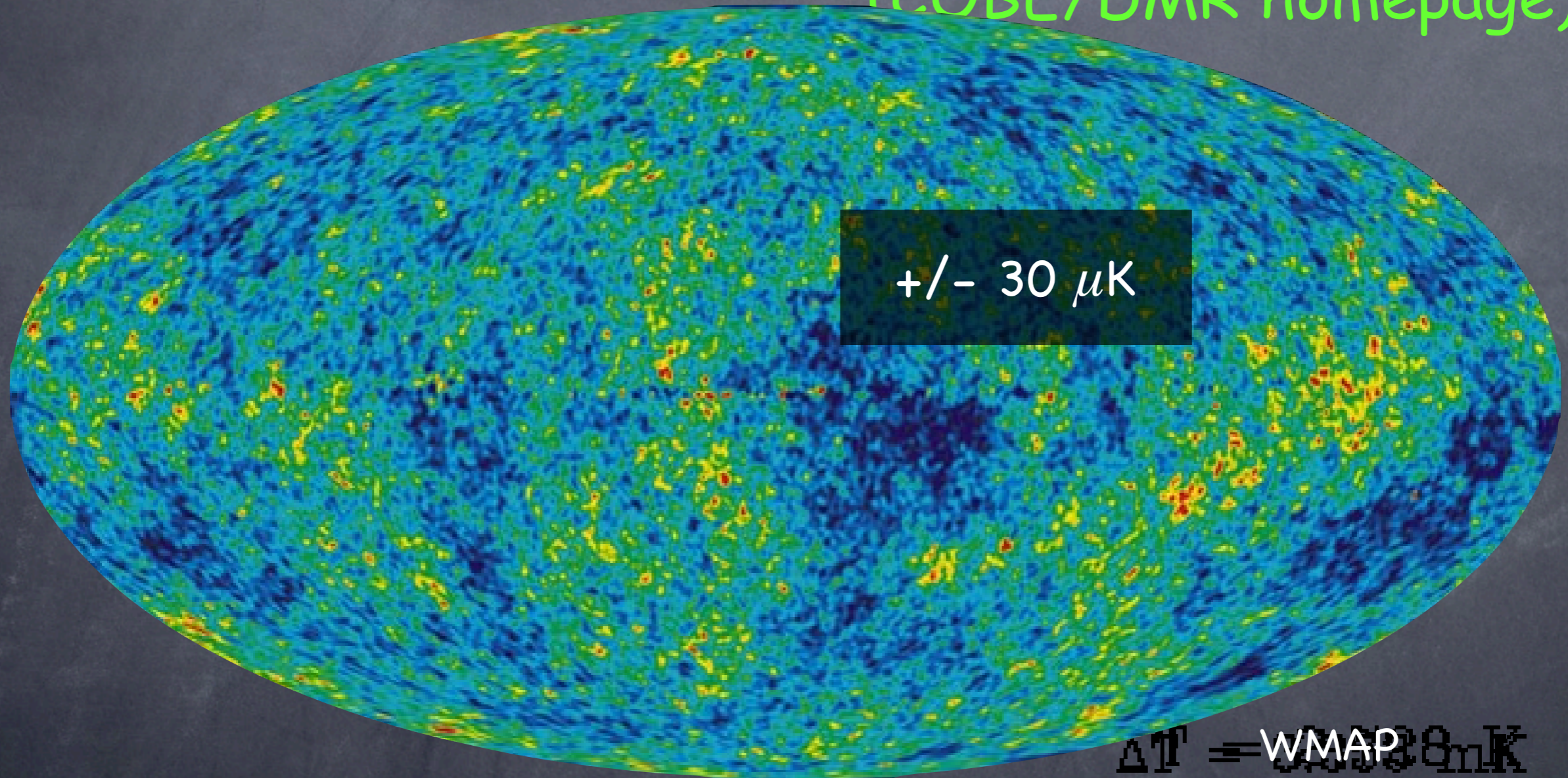
Homogénéité et isotropie

(COBE/DMR homepage)



Homogénéité et isotropie

(COBE/DMR homepage)



Homogénéité et isotropie

la forme générale de la métrique est figée :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$

facteur d'échelle

courbure spatiale (-1,0 ou 1)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

métrique de la relativité restreinte (Minkowski)

Propriétés RG+PC : expansion



Lemaître

- 1927 : l'abbé Georges Lemaître trouve des solutions **dynamiques** aux équations d'Einstein : il prédit l'**expansion** de l'Univers et qu'elle se ferait selon $v \propto d$

- 1929 : Edwin Hubble établit la relation entre vitesse de fuite des nébuleuses et leur distance mais ne fait pas le lien avec l'expansion



Hubble

Propriétés RG+PC : expansion

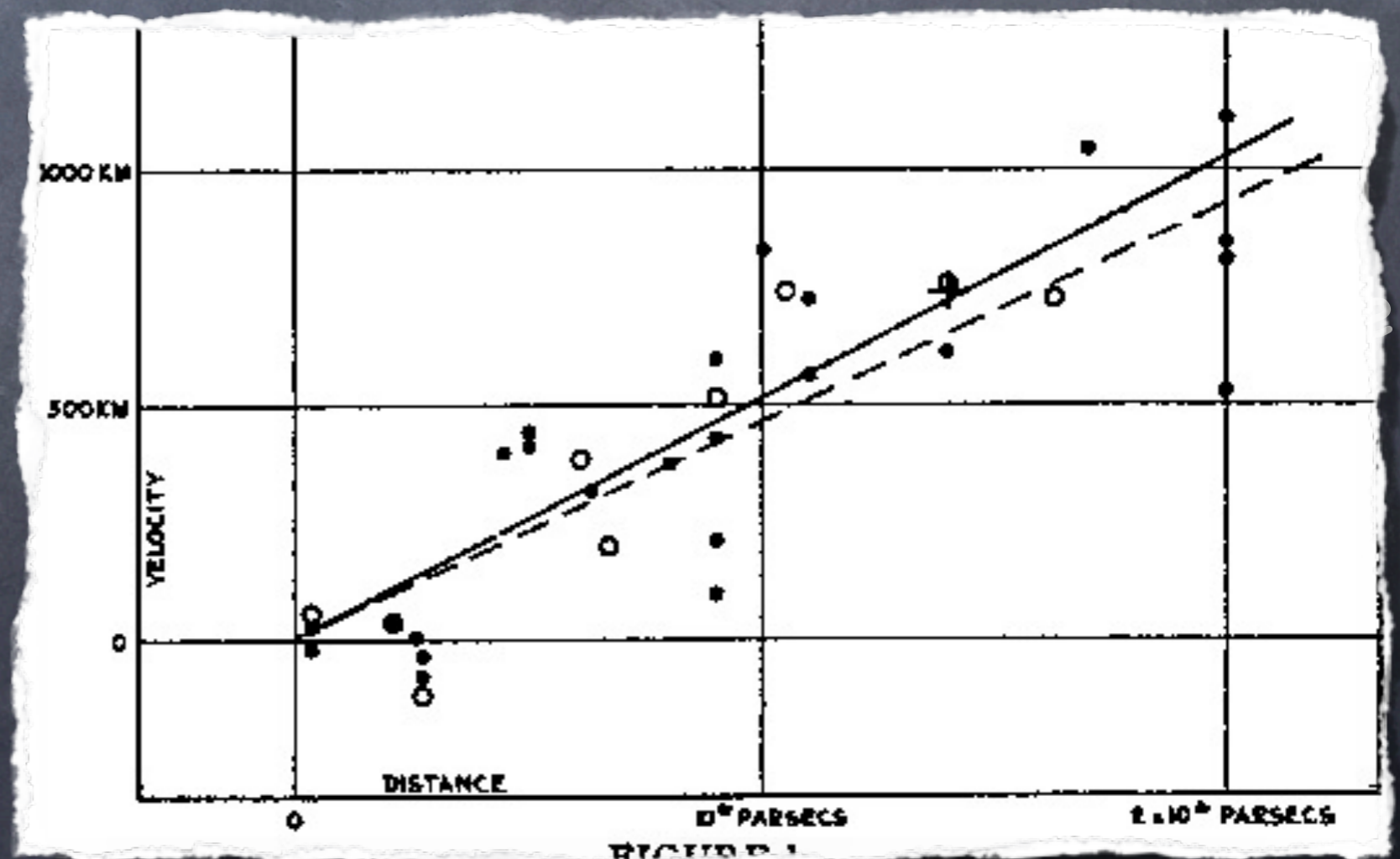
- 1927 : l'abbé Georges Lemaître trouve des solutions **dynamiques** aux équations d'Einstein : il prédit l'**expansion** de l'Univers et qu'elle se ferait selon $v \propto d$



Lemaître



Hubble



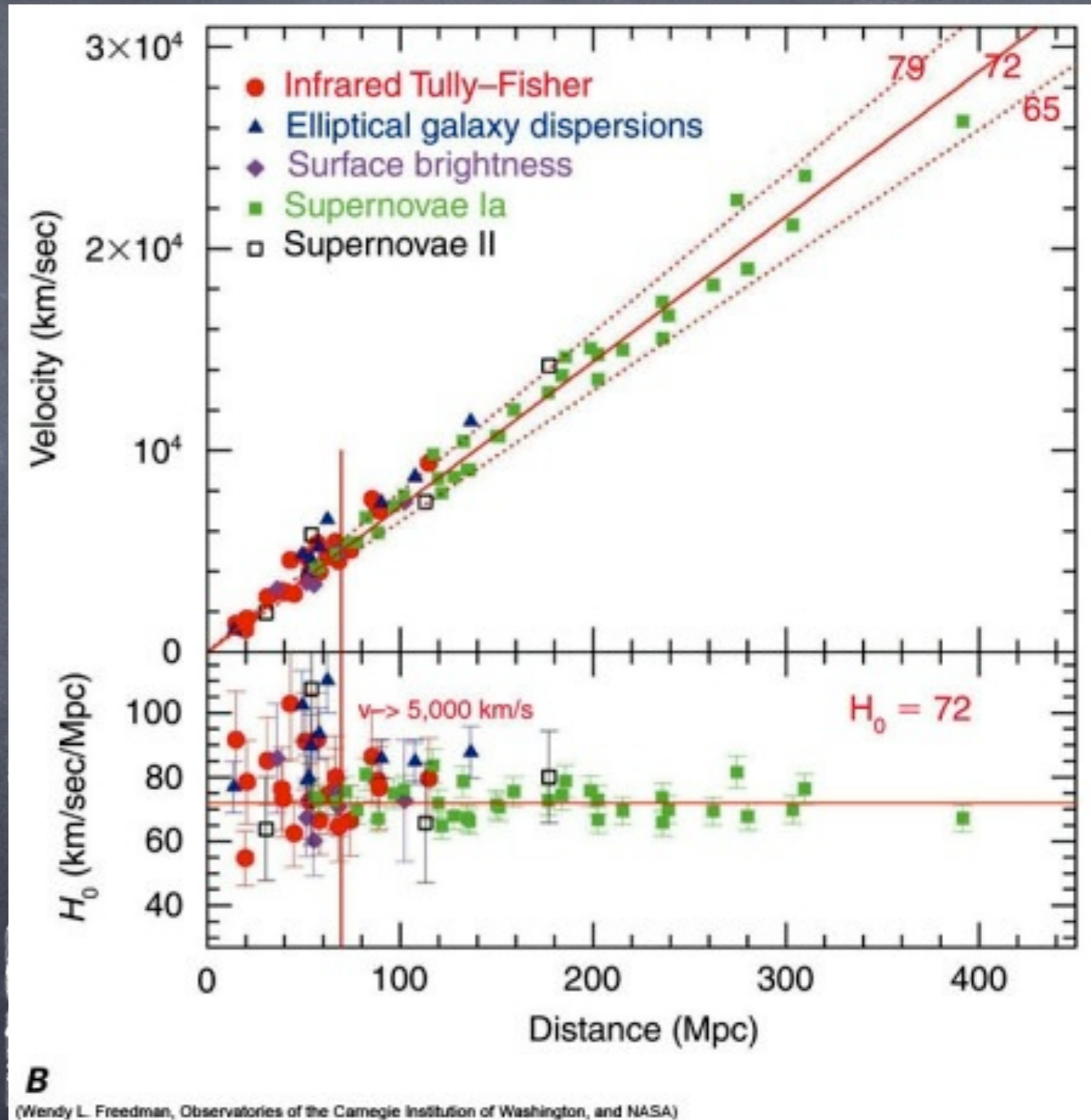
Propriétés RG+PC : expansion



Lemaître



Hubble

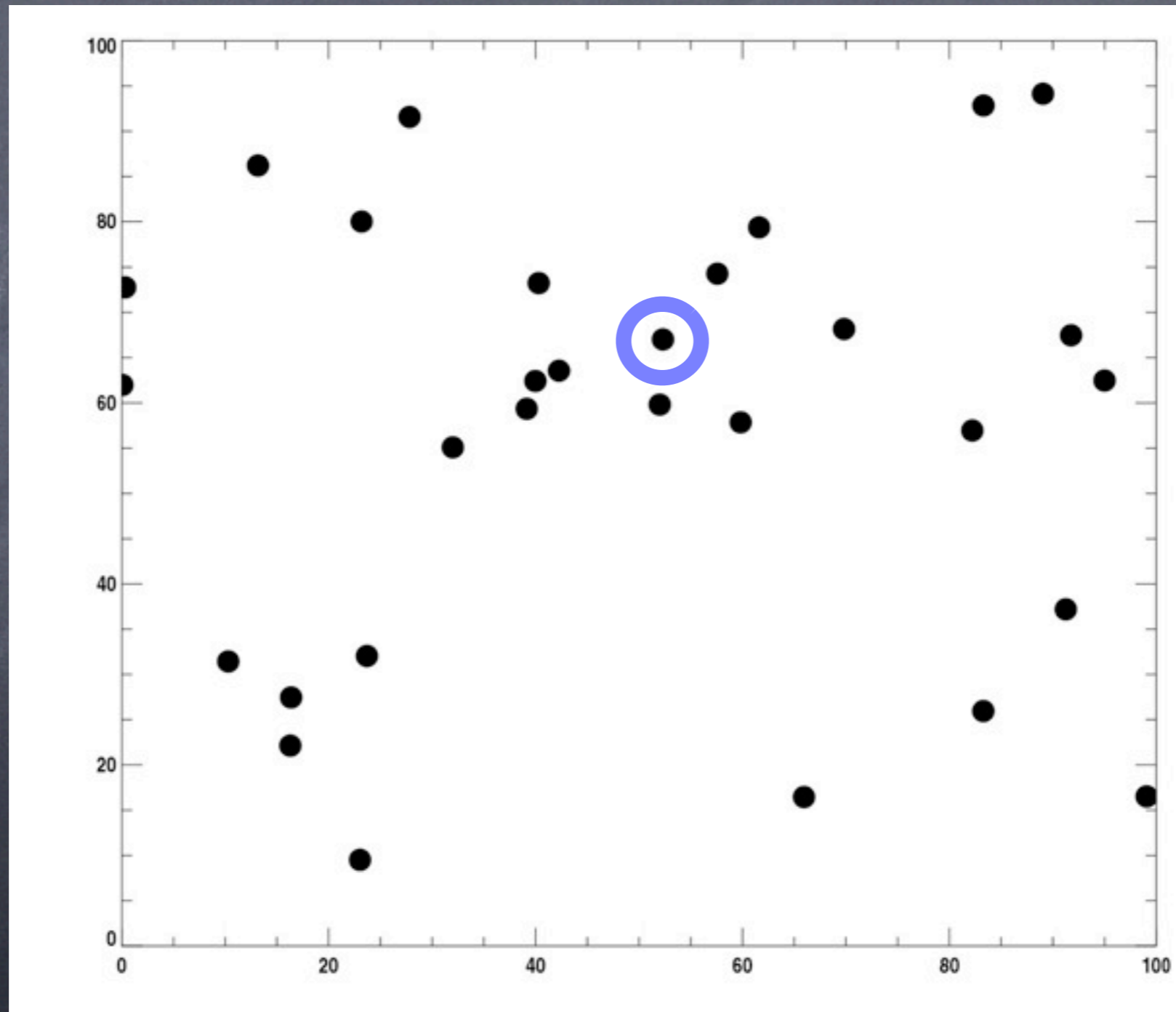


Propriétés RG+PC : expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :

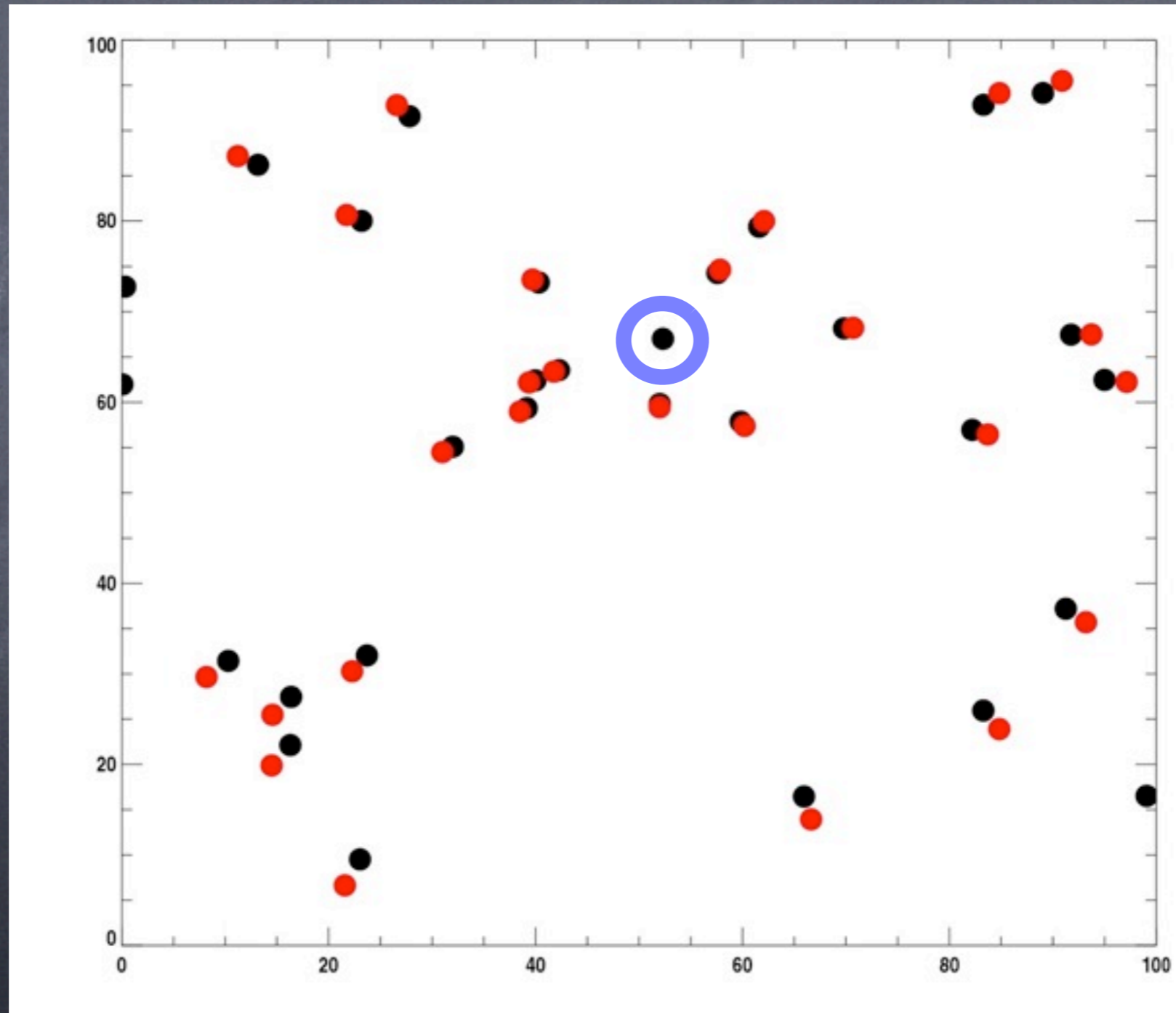
Propriétés RG+PC : expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :



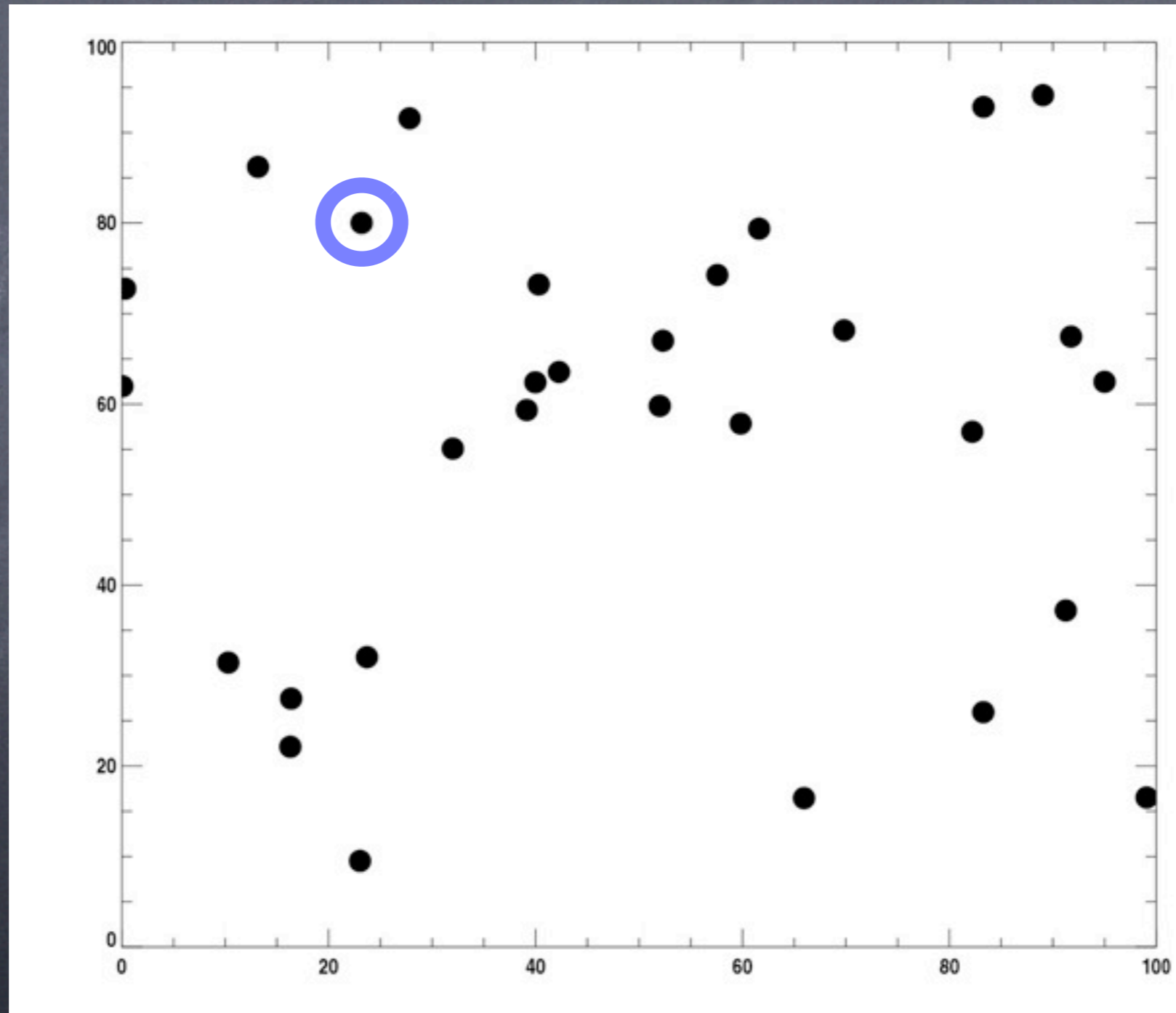
Propriétés RG+PC : expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :



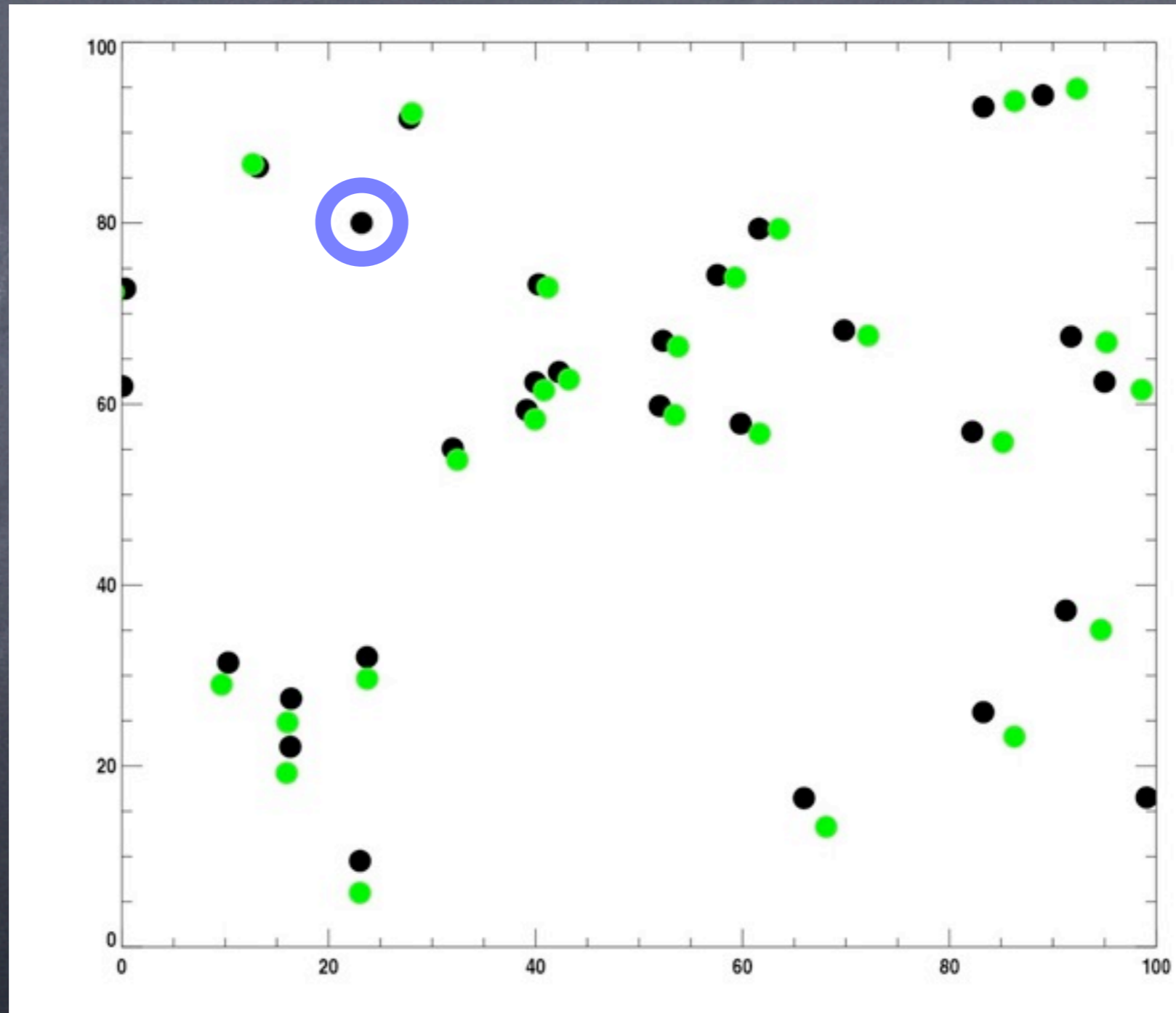
Propriétés RG+PC : expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :



Propriétés RG+PC : expansion

L'expansion de l'univers se fait de façon isotrope :



Propriétés RG+PC : expansion

$$v = H d$$

vitesse de
fuite
d'un objet

"constante"
de Hubble

distance
observateur-objet



Gamow

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

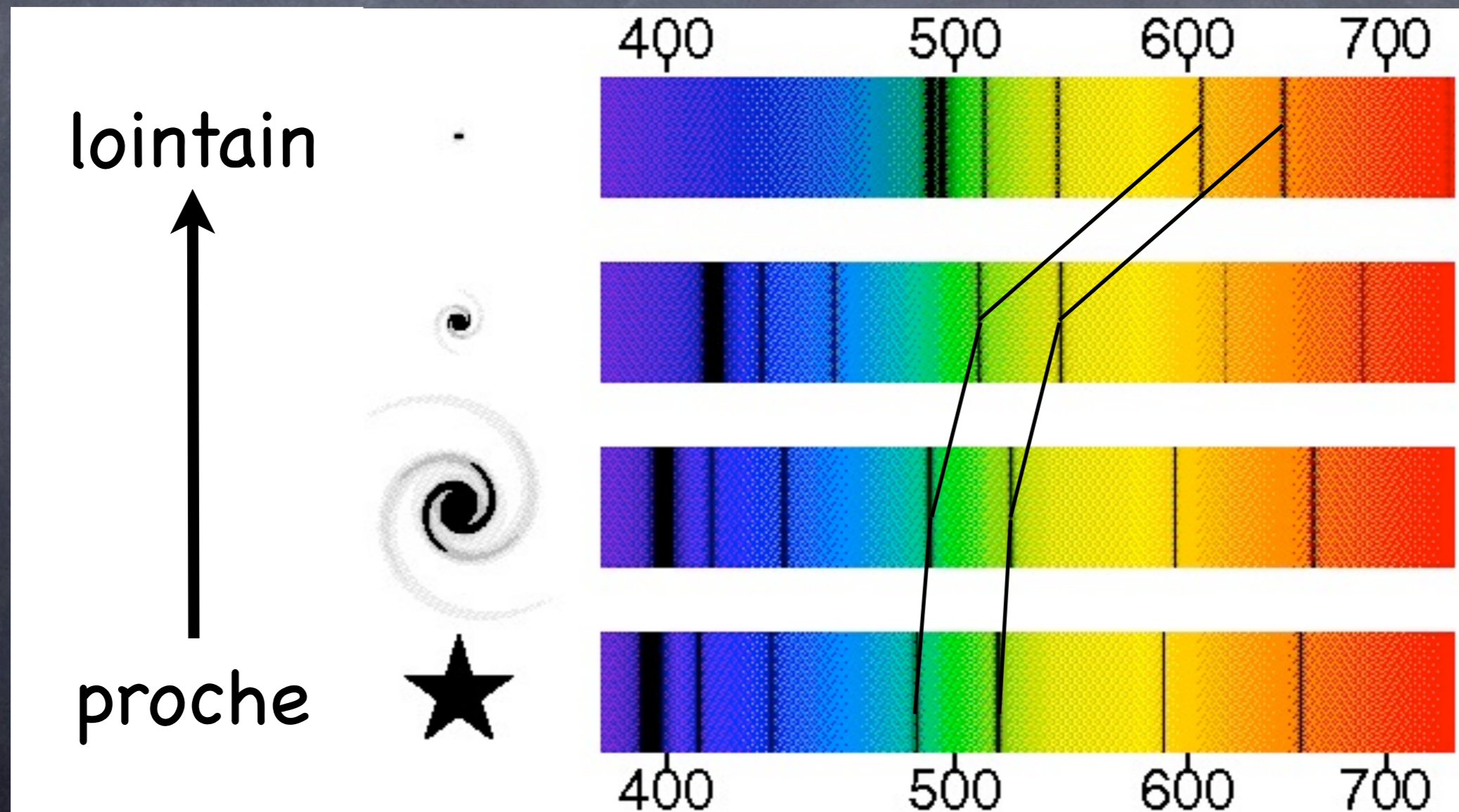
Propriétés RG+PC : redshift

l'expansion de l'Univers produit un effet comparable à l'effet Doppler mais sur la
lumière

Propriétés RG+PC : redshift

l'expansion de l'Univers produit un effet comparable à l'effet Doppler mais sur la

lumière

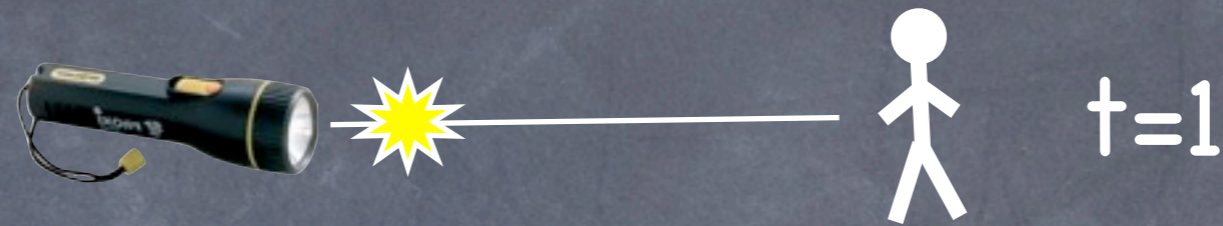


Propriétés RG+PC : redshift

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

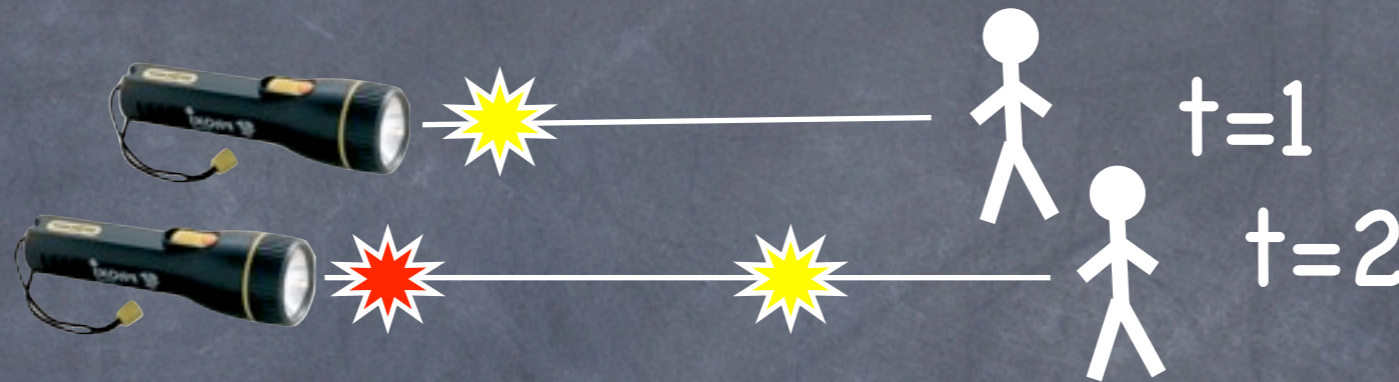
Propriétés RG+PC : redshift

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



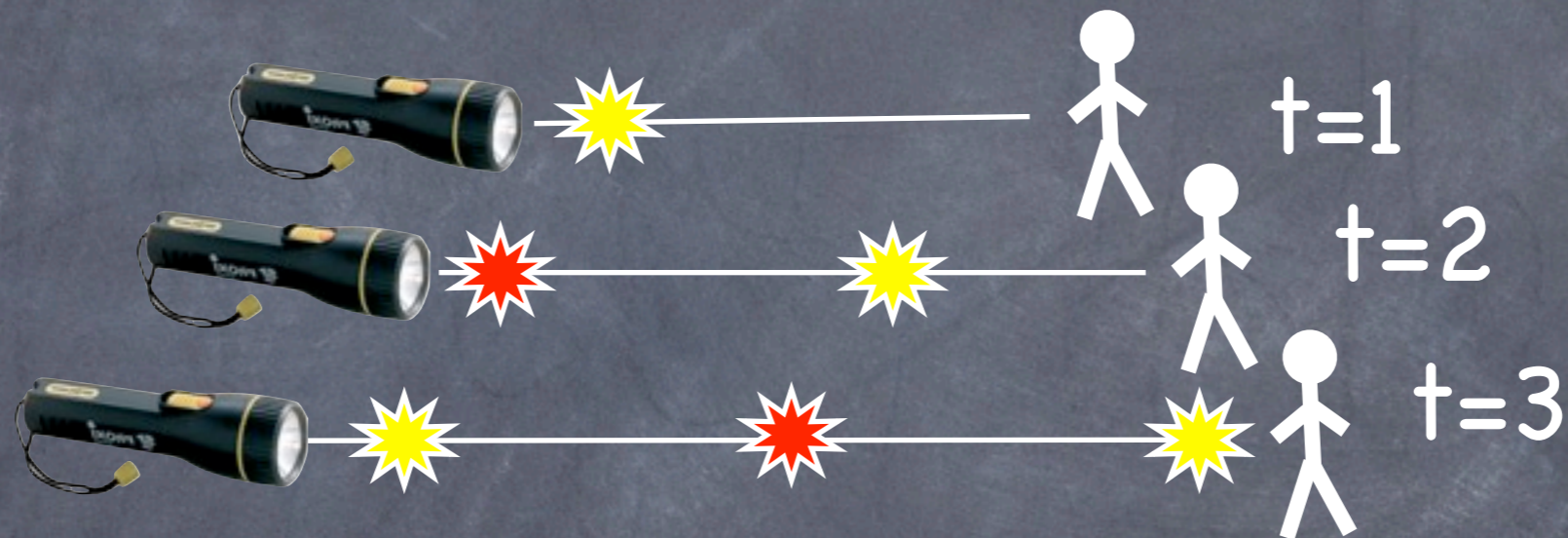
Propriétés RG+PC : redshift

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



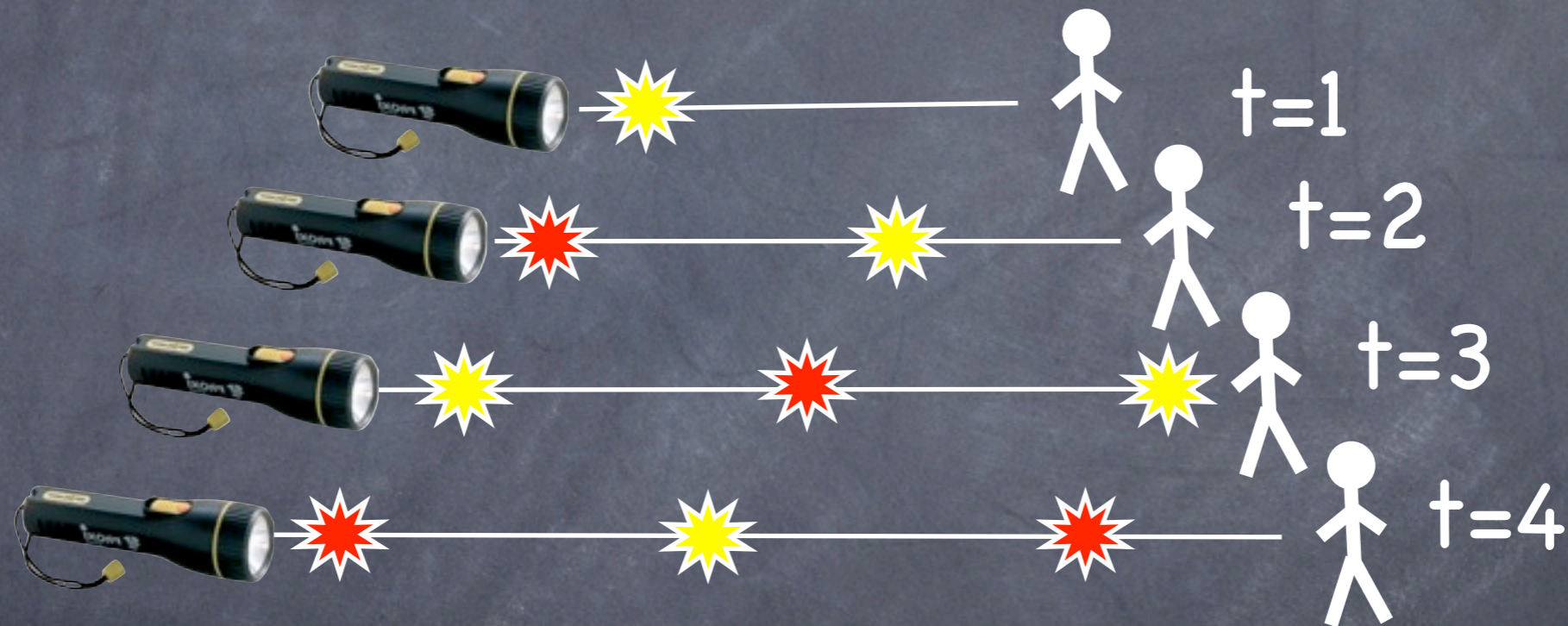
Propriétés RG+PC : redshift

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



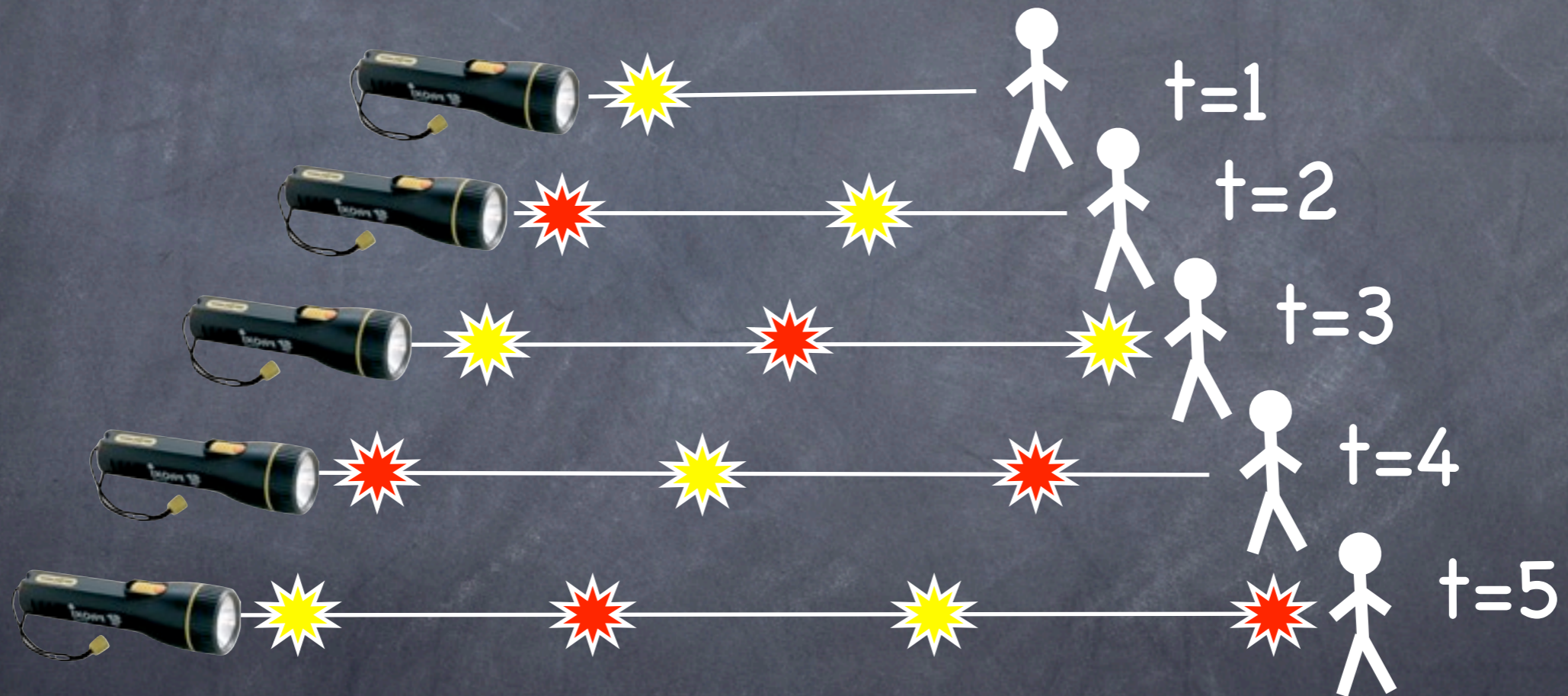
Propriétés RG+PC : redshift

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



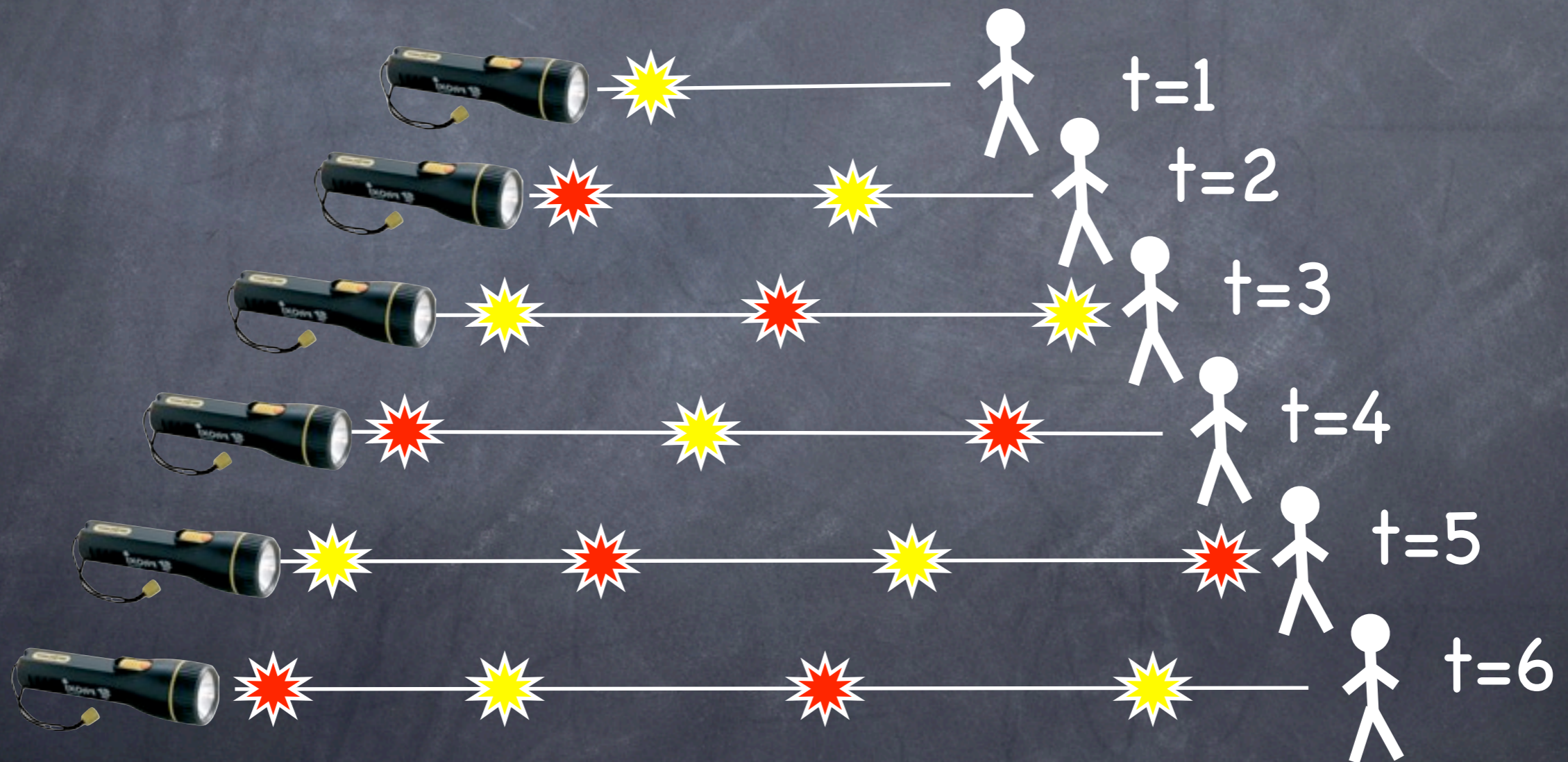
Propriétés RG+PC : redshift

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



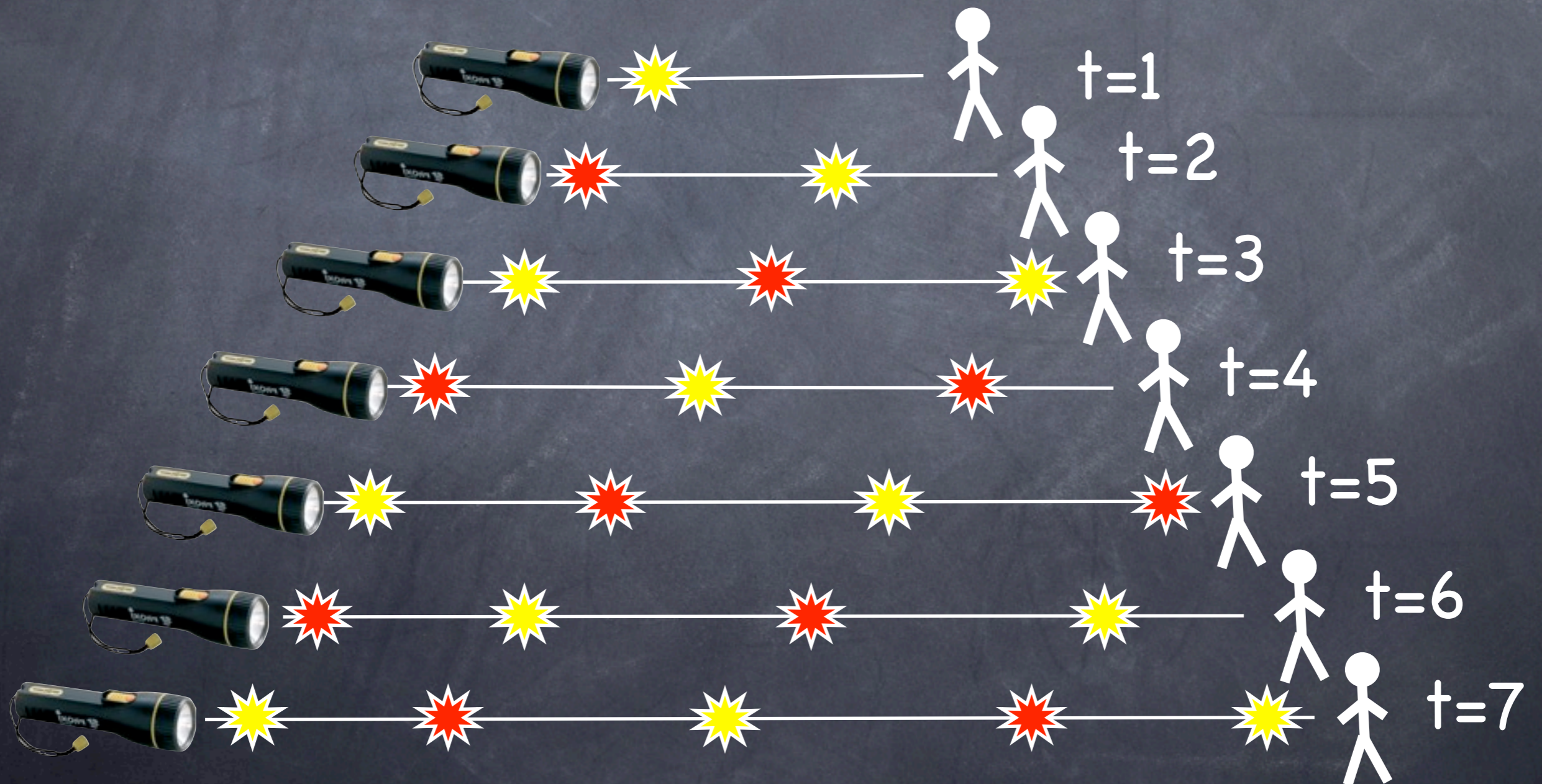
Propriétés RG+PC : redshift

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



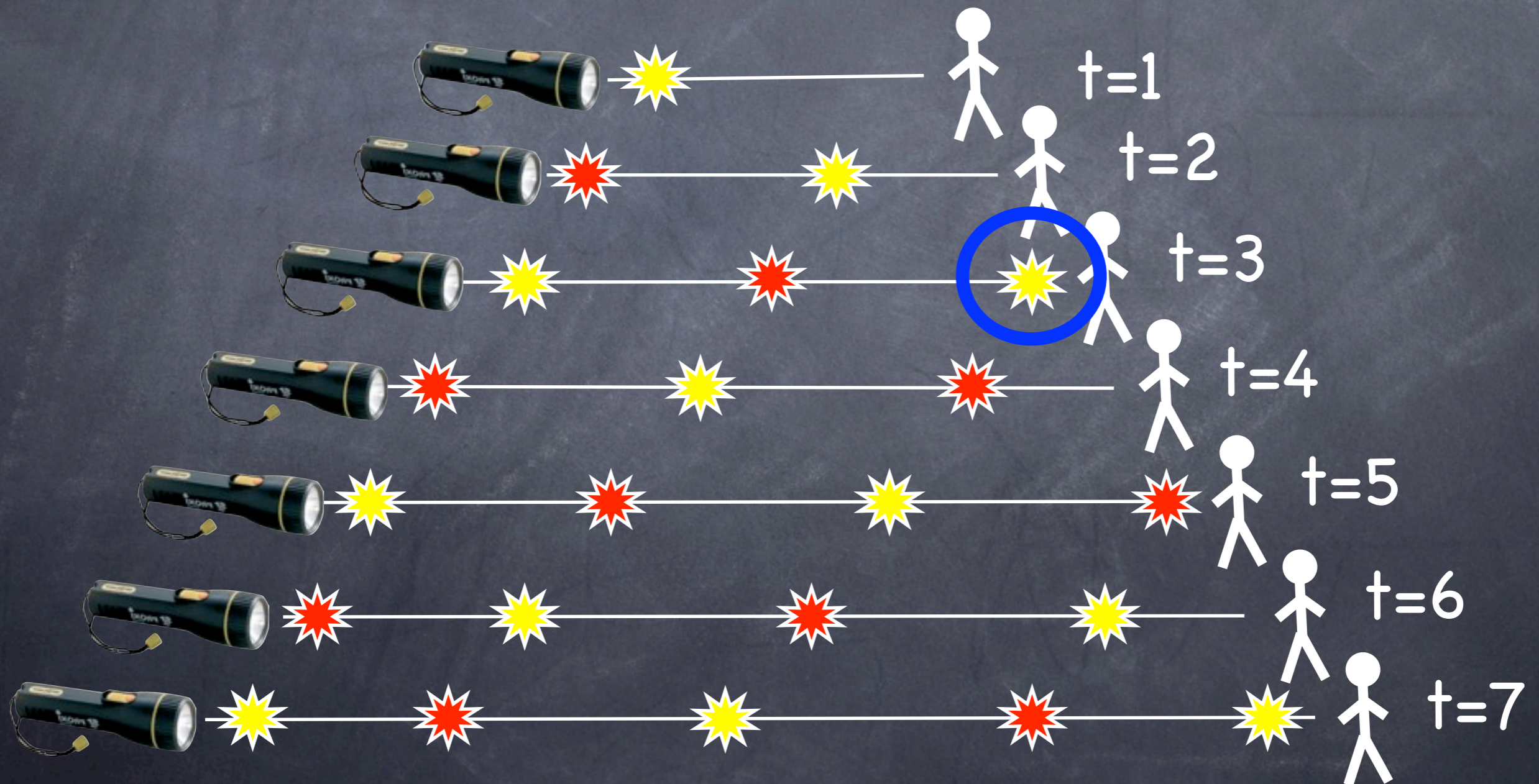
Propriétés RG+PC : redshift

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



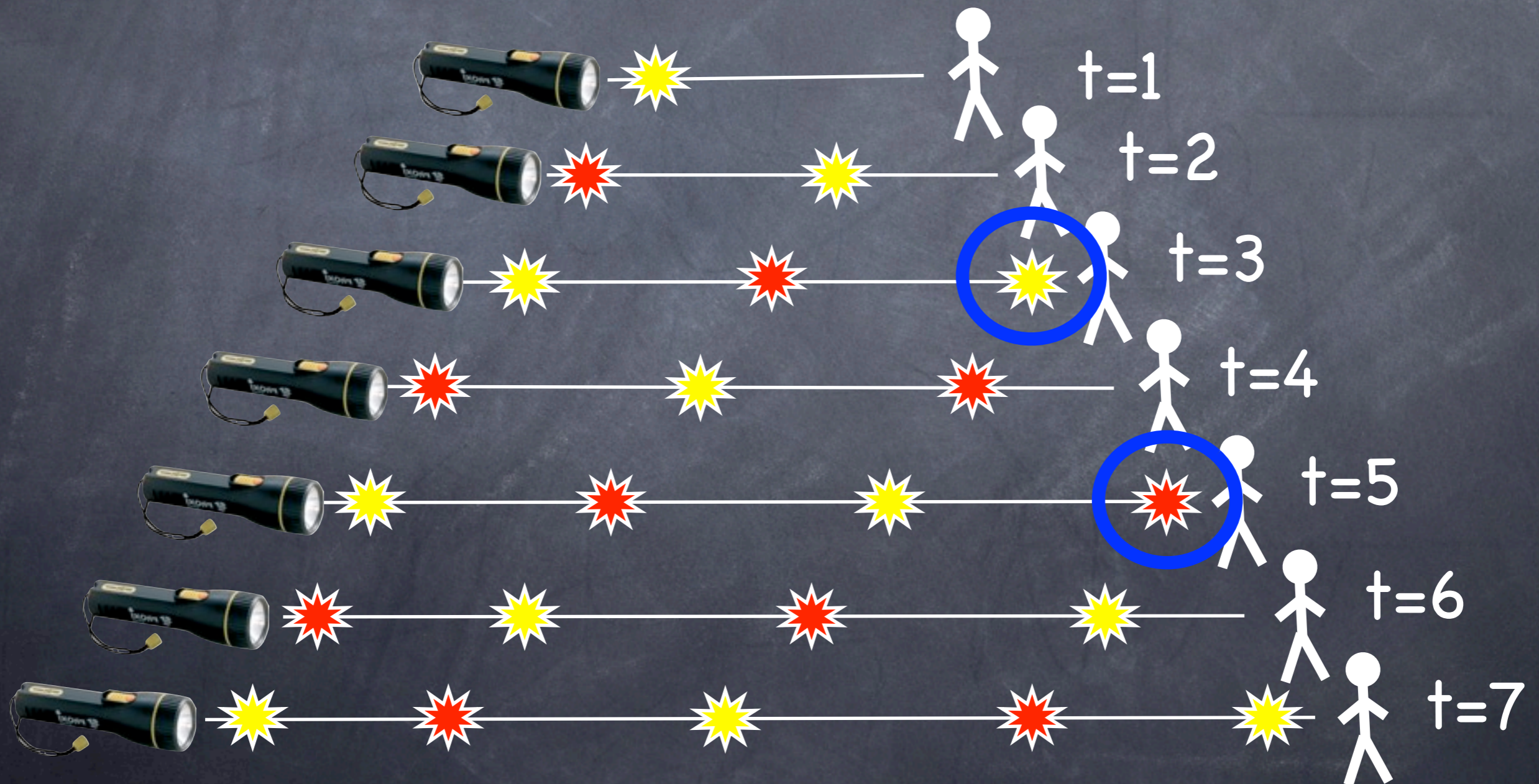
Propriétés RG+PC : redshift

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



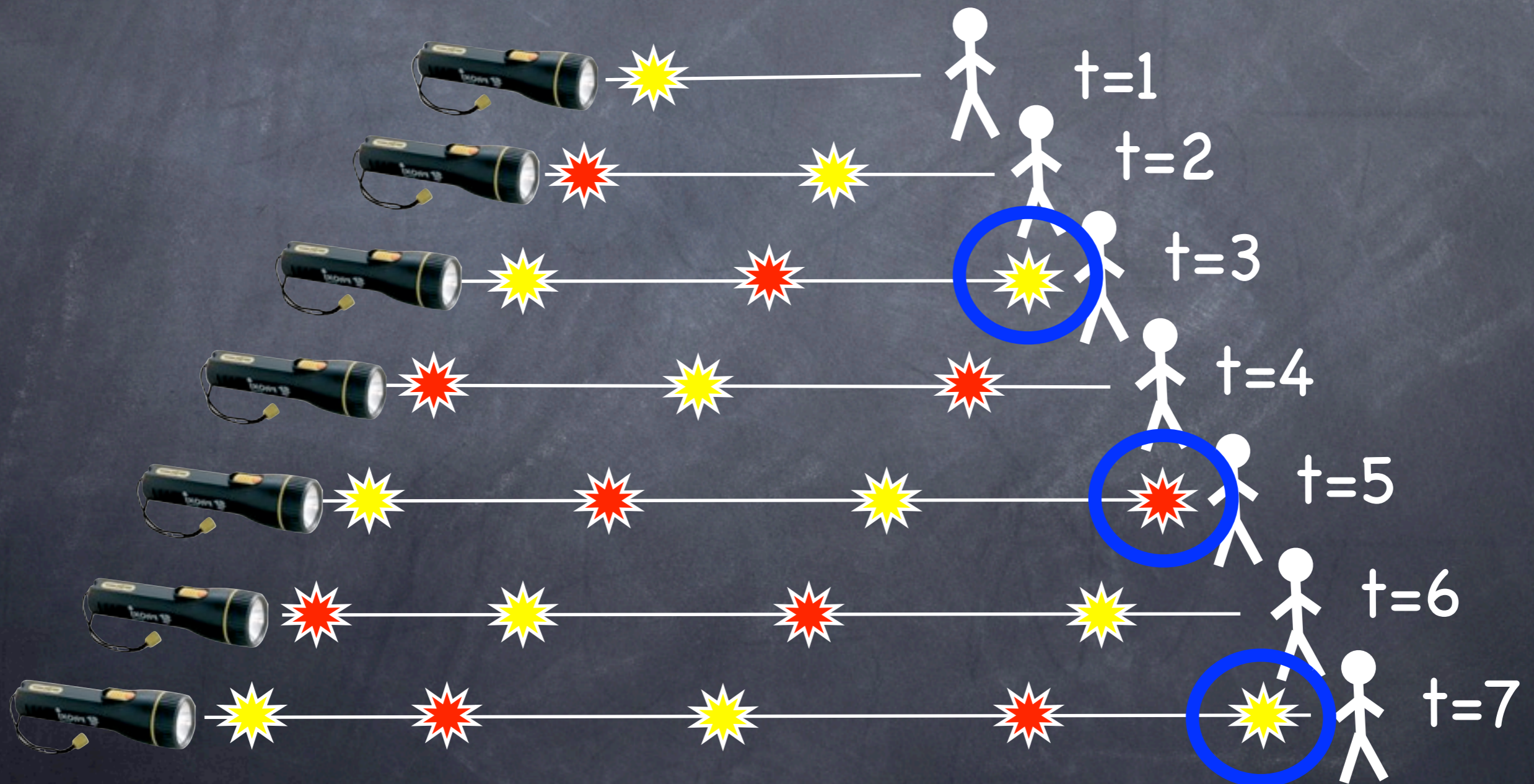
Propriétés RG+PC : redshift

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



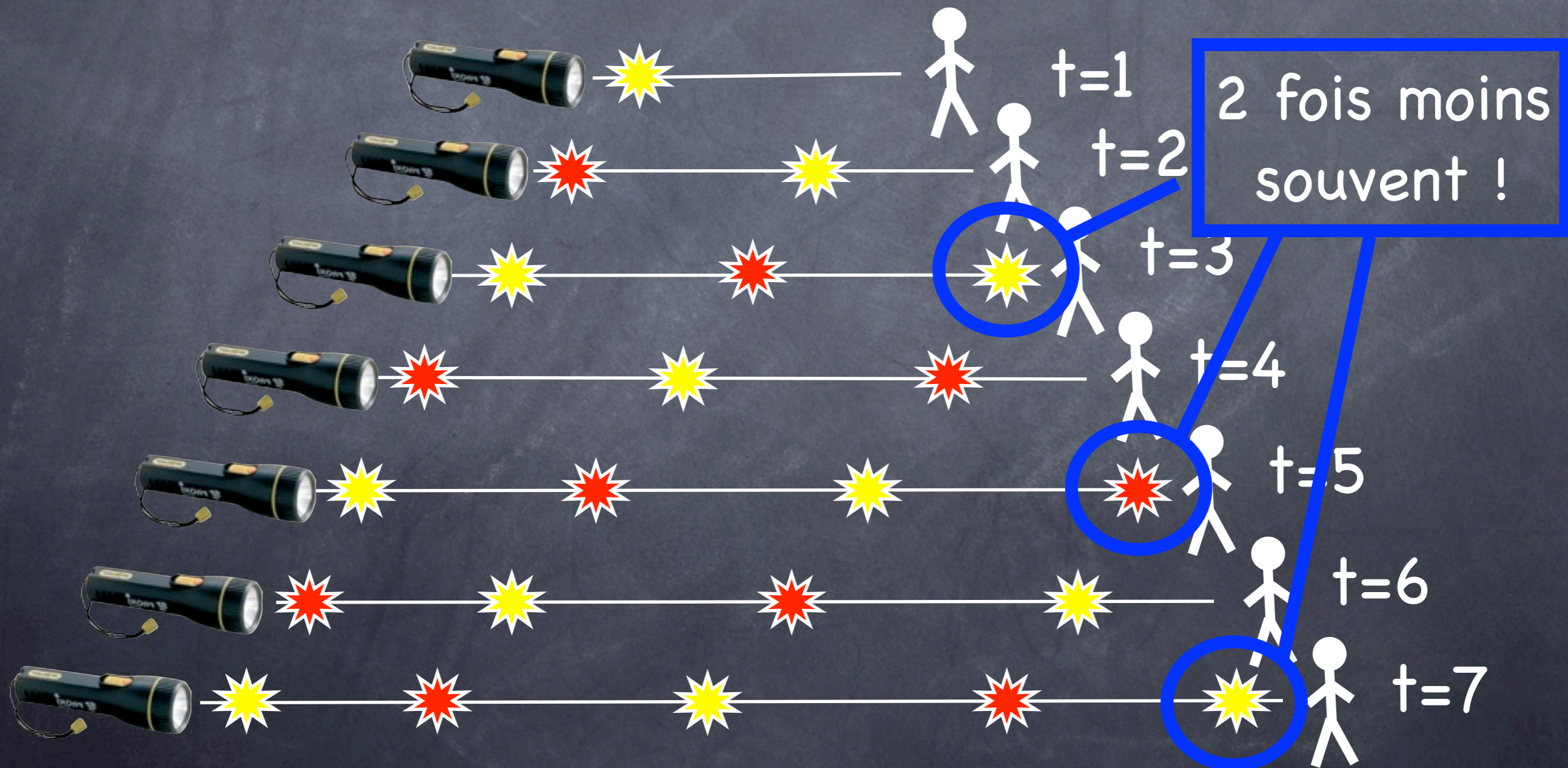
Propriétés RG+PC : redshift

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



Propriétés RG+PC : redshift

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



Propriétés RG+PC : redshift

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

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

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

Andromède (800 kpc) : $z = 0.0002$!

Propriétés RG+PC : équations d'Einstein

On peut résoudre les équations d'Einstein...

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

... dès lors que l'on adhère au principe cosmologique car dans ce cas, la métrique est celle de FRLW :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$

Propriétés RG+PC : équations de Friedmann

a est le facteur d'échelle

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} - \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

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

Propriétés RG+PC : équations de Friedmann

a est le facteur d'échelle

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} - \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

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

ATTENTION !

les équations de Friedmann ont été obtenues sous l'hypothèse du principe cosmologique par conséquent, elles ne sont pas valables pour des systèmes liés par la gravitation

Propriétés RG+PC 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

Propriétés RG+PC paramètres cosmologiques

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

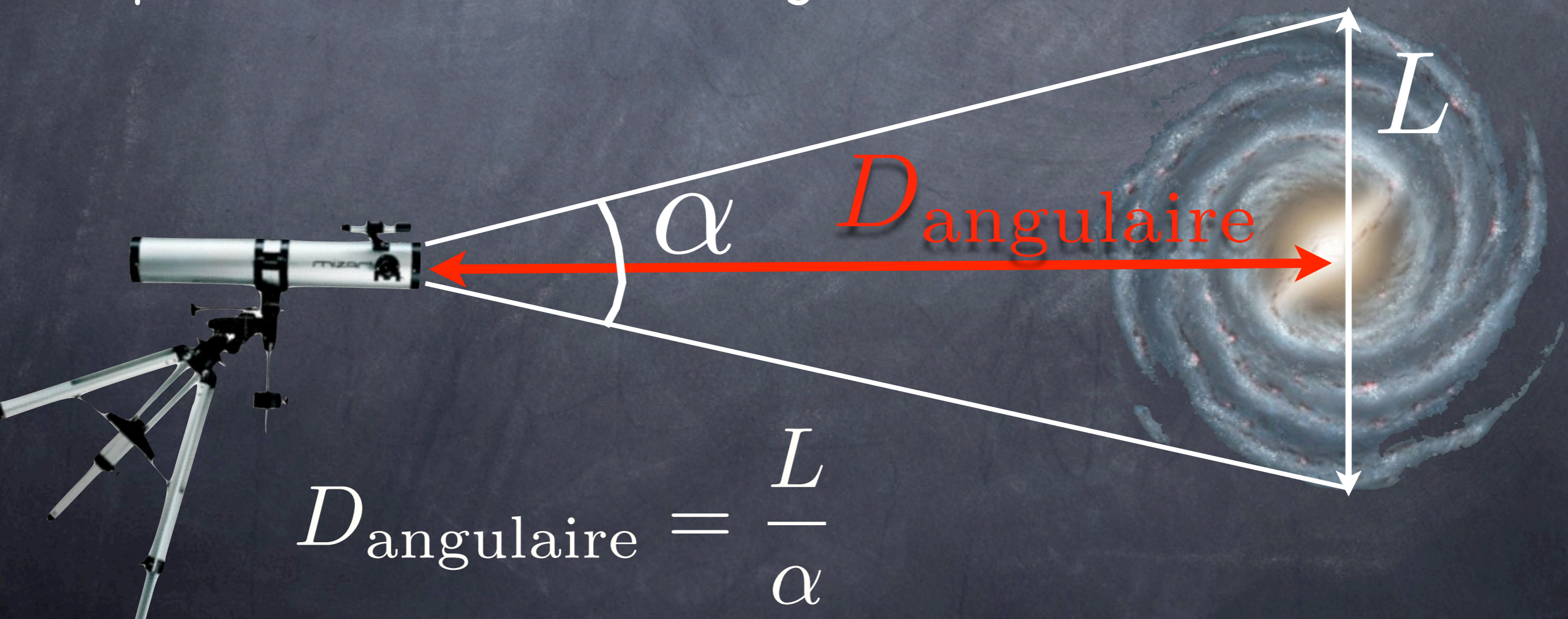
Objectif : mesurer les paramètres cosmologiques

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

Propriétés RG+PC : distances

la distance **propre** entre 2 objets n'est **pas mesurable**
(il faudrait une infinité de mesures instantanées)

on définit 2 distances à partir de notre
expérience "terrestre" (analogie Euclidienne) :



$$D_{\text{angulaire}} = \frac{L}{\alpha}$$

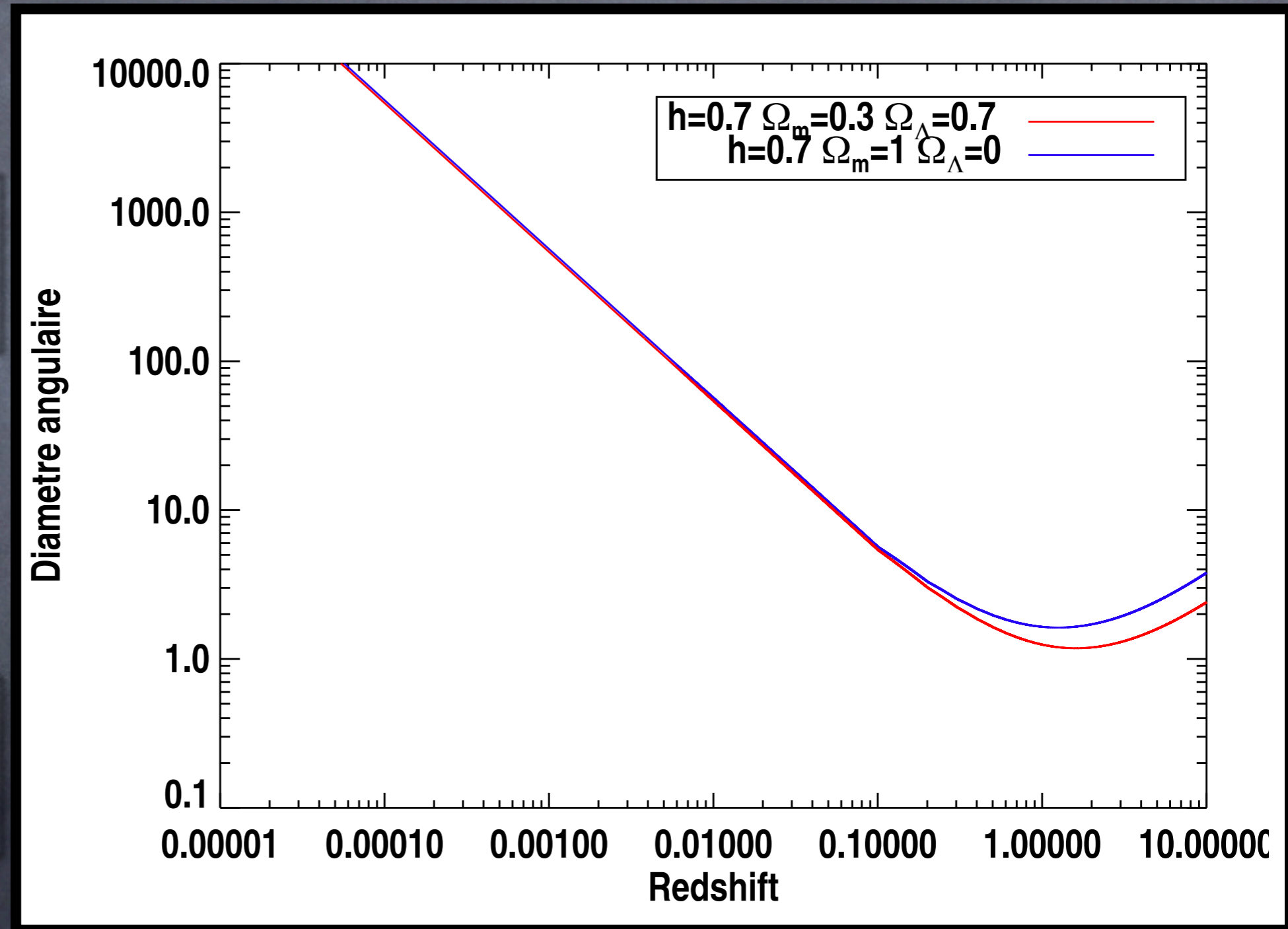
Propriétés RG+PC : distances

objets
proches :

$$\alpha \propto 1/z$$

objets
lointains :

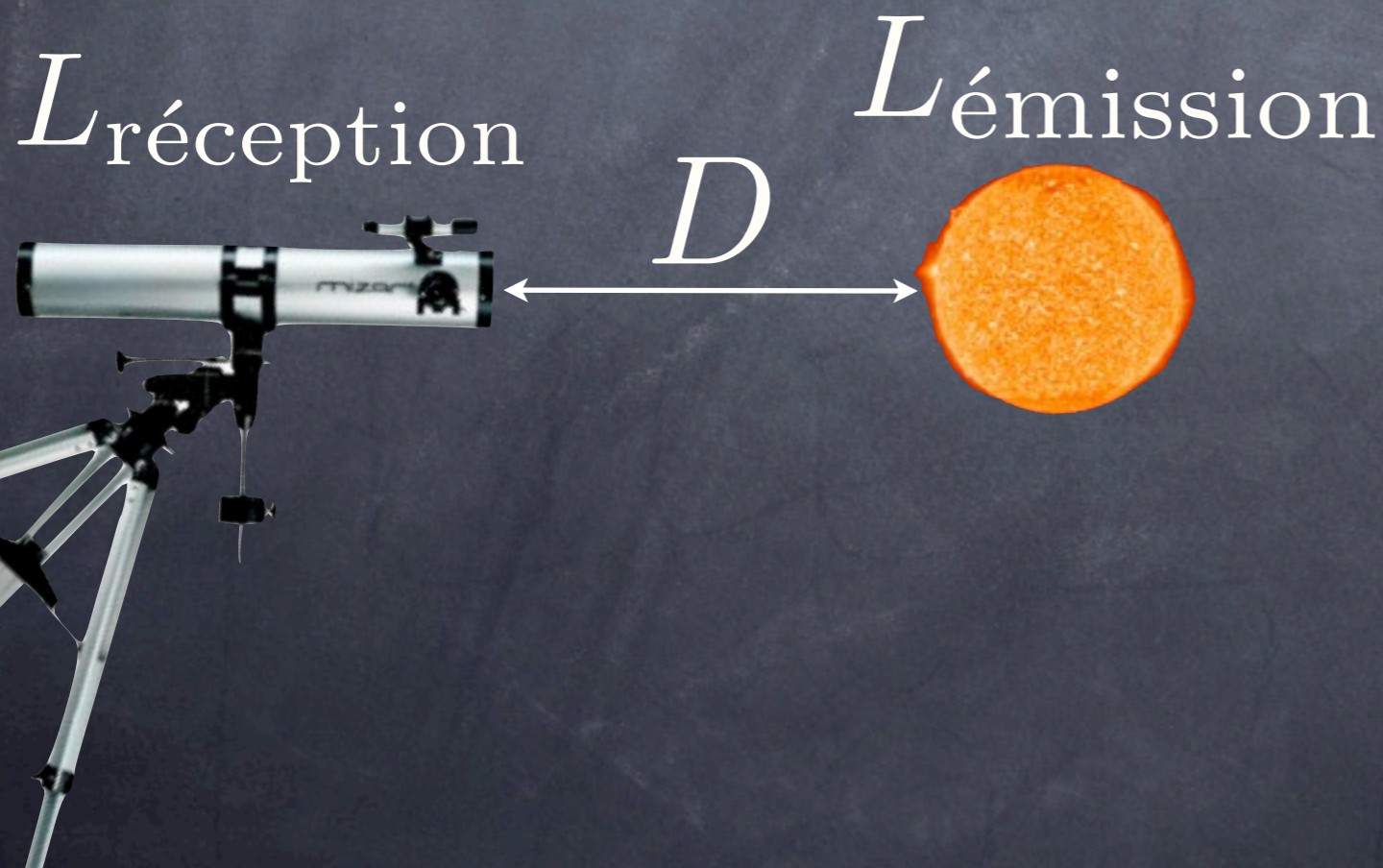
$$\alpha \propto z !$$



Propriétés RG+PC : distances

On utilise également la distance de luminosité :

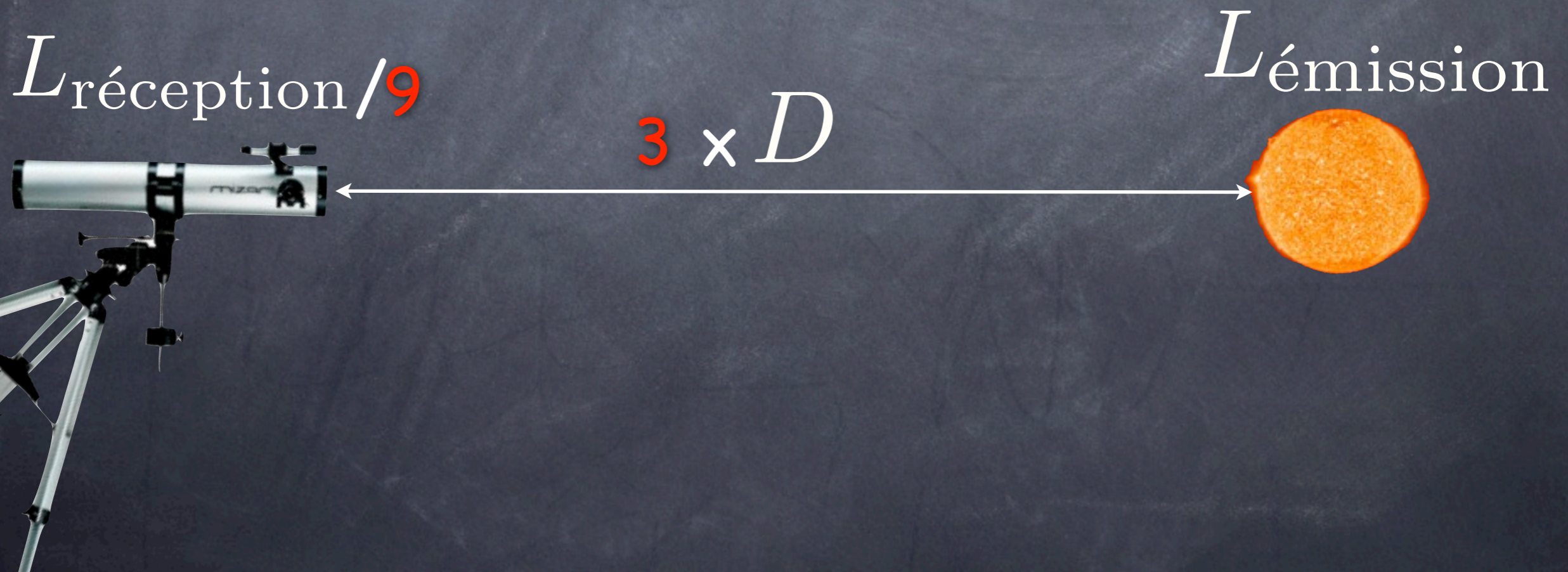
univers Euclidien : la luminosité apparente
d'une source (étoile, galaxie...) diminue
comme le **carré** de la distance



Propriétés RG+PC : distances

On utilise également la distance de luminosité :

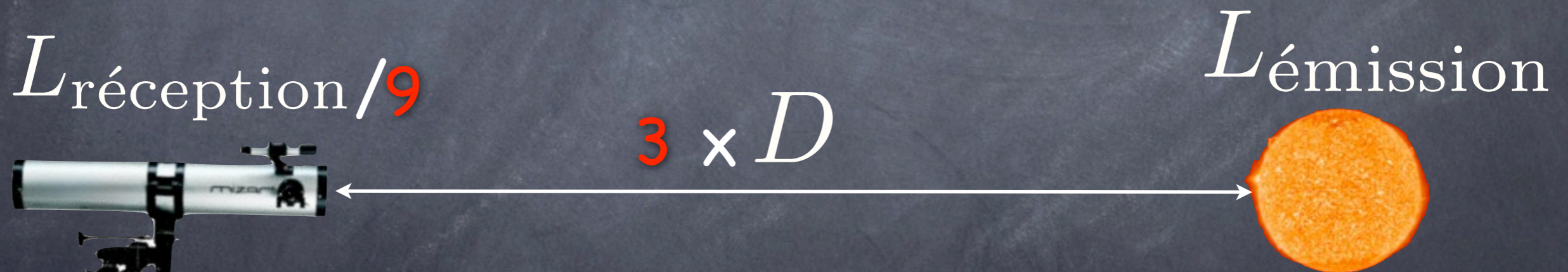
univers Euclidien : la luminosité apparente d'une source (étoile, galaxie...) diminue comme le **carré** de la distance



Propriétés RG+PC : distances

On utilise également la distance de luminosité :

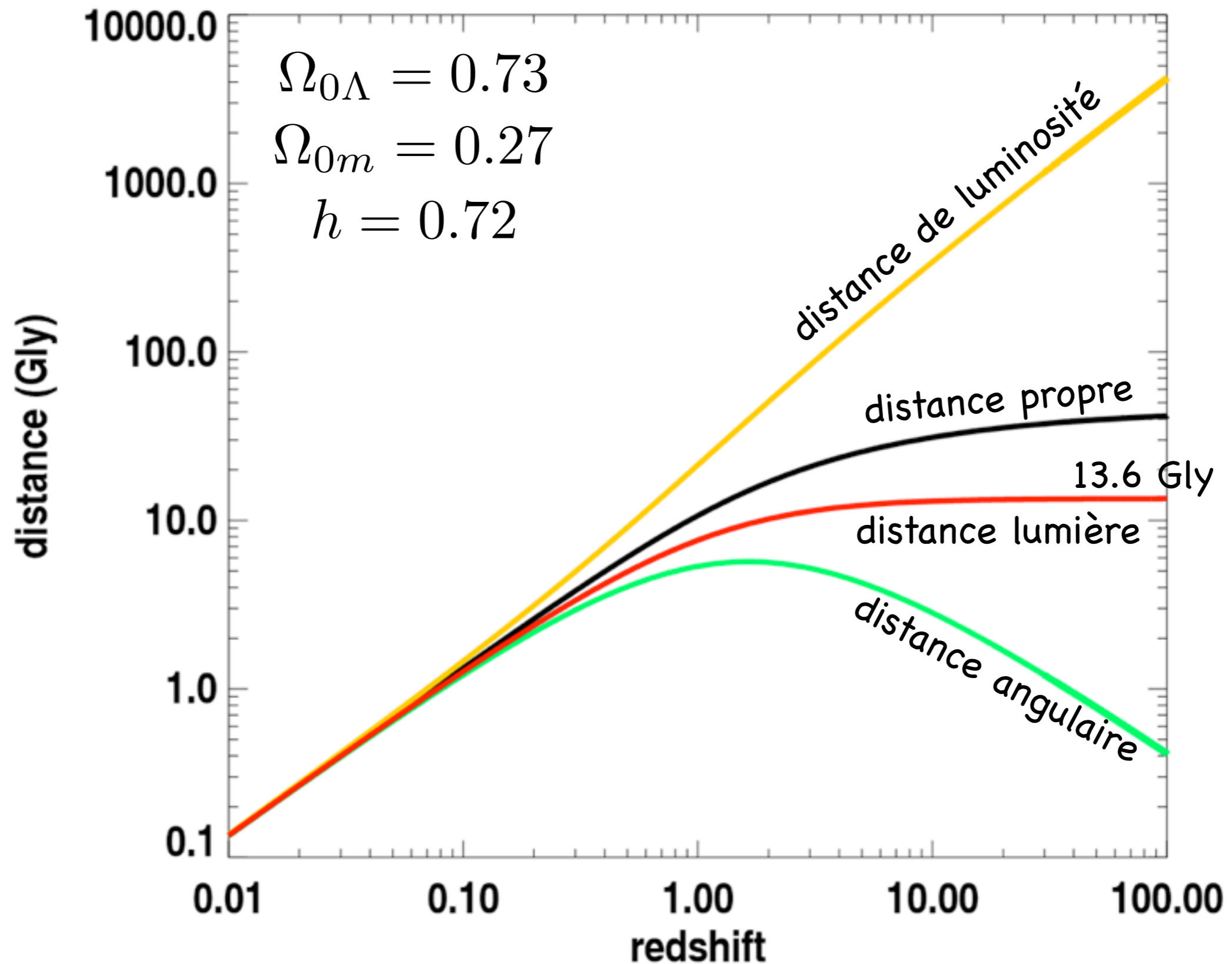
univers Euclidien : la luminosité apparente d'une source (étoile, galaxie...) diminue comme le **carré** de la distance



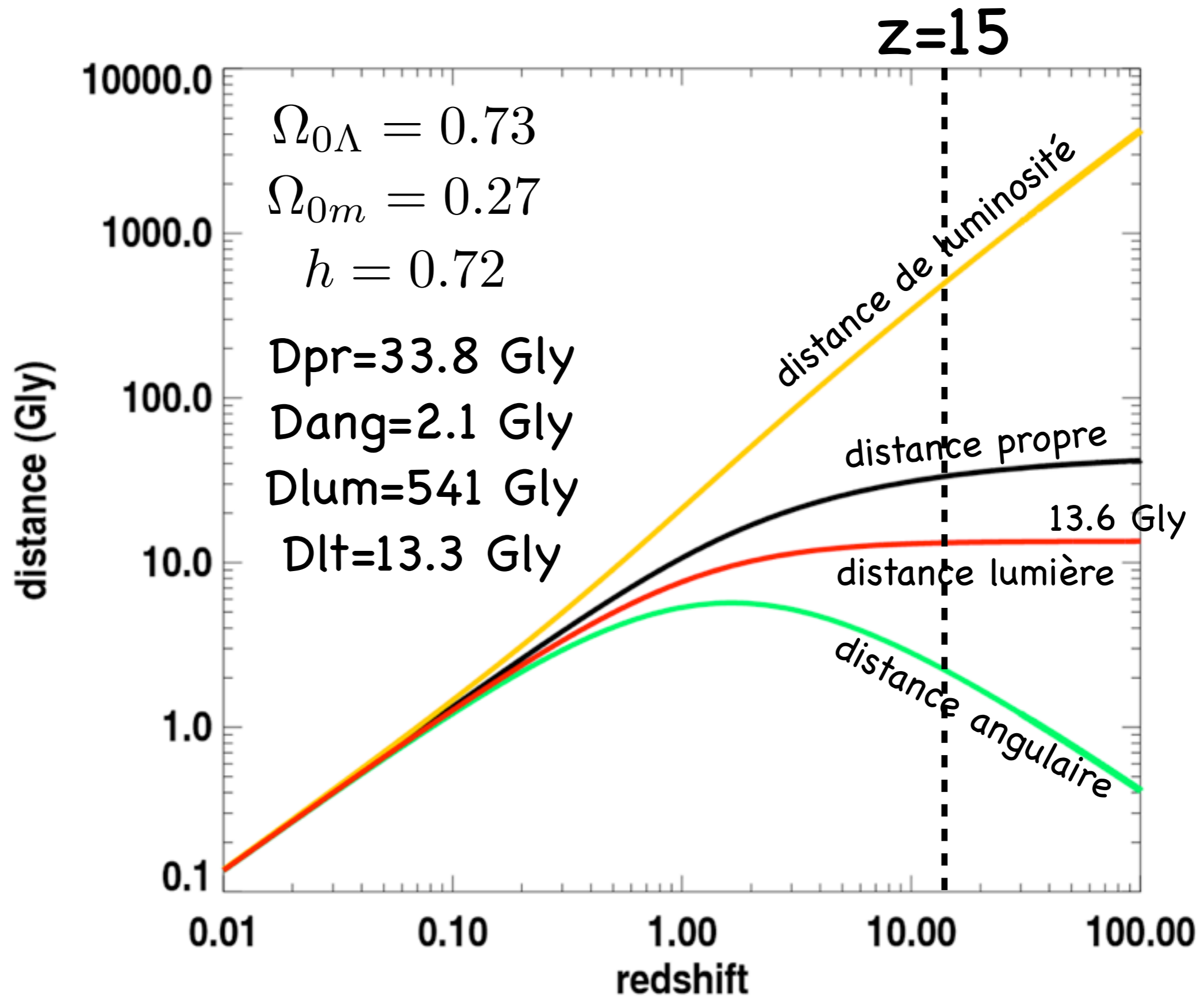
Dans un univers en expansion, on trouve :

$$D_{\text{luminosité}} = (1 + z)^2 D_{\text{angulaire}}$$

Propriétés RG+PC : distances



Propriétés RG+PC : distances



Bilan intermédiaire

relativité générale = modèle cosmologique
ajout du principe cosmologique : expansion !
quelques propriétés de ce type d'Univers
(redshift, distances, horizon)

mais...

l'Univers décrit jusque là est **vide** !

ingrédients : les particules et atomes

Le Big-Bang

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

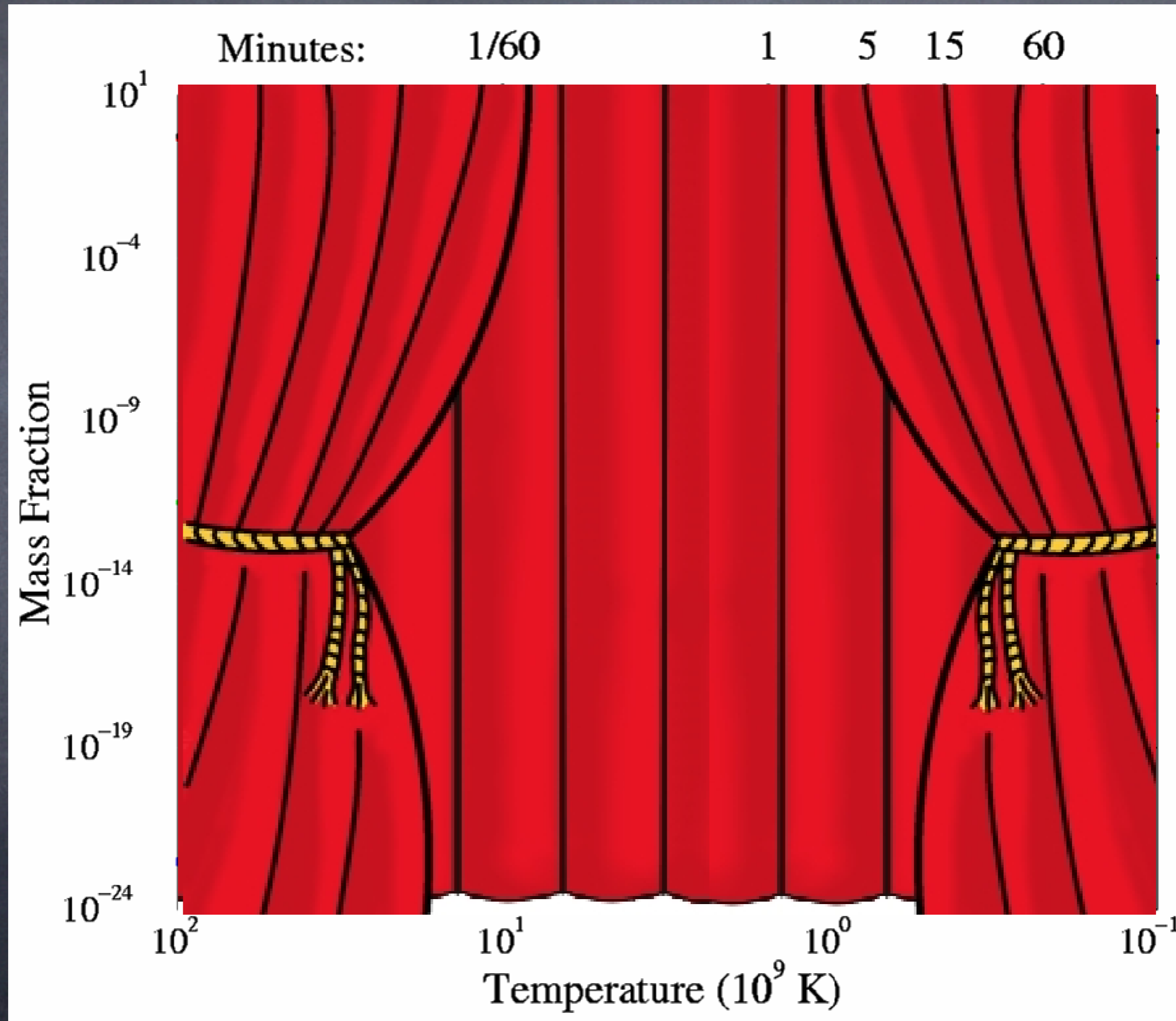
George Washington University, Washington, D. C.

June 21, 1948

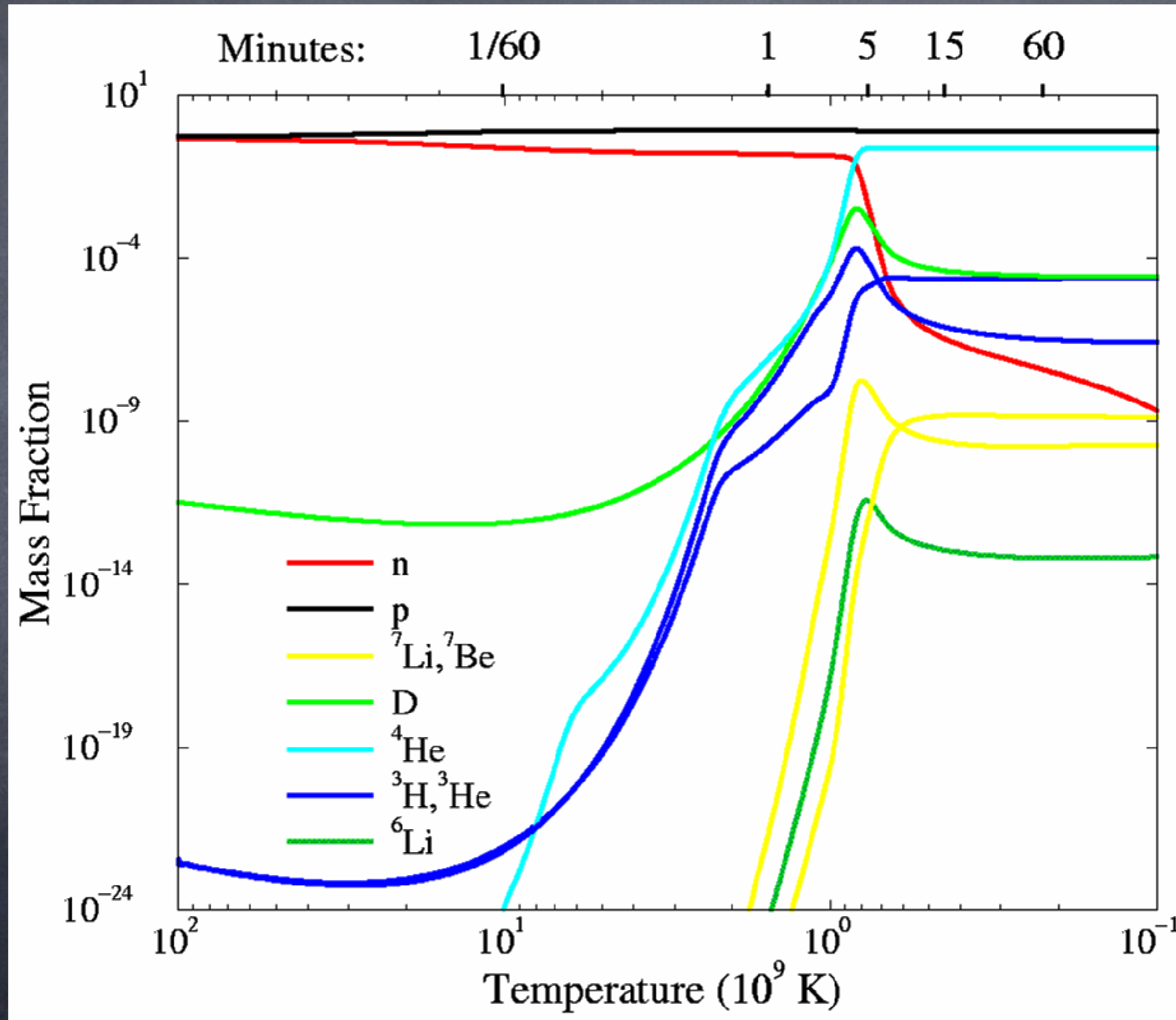
Gamow : Nucléosynthèse primordiale

- l'Univers est en expansion (on le sait depuis Lemaître et Hubble)
- il était donc plus petit et donc plus chaud dans le passé
- nous sommes 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)

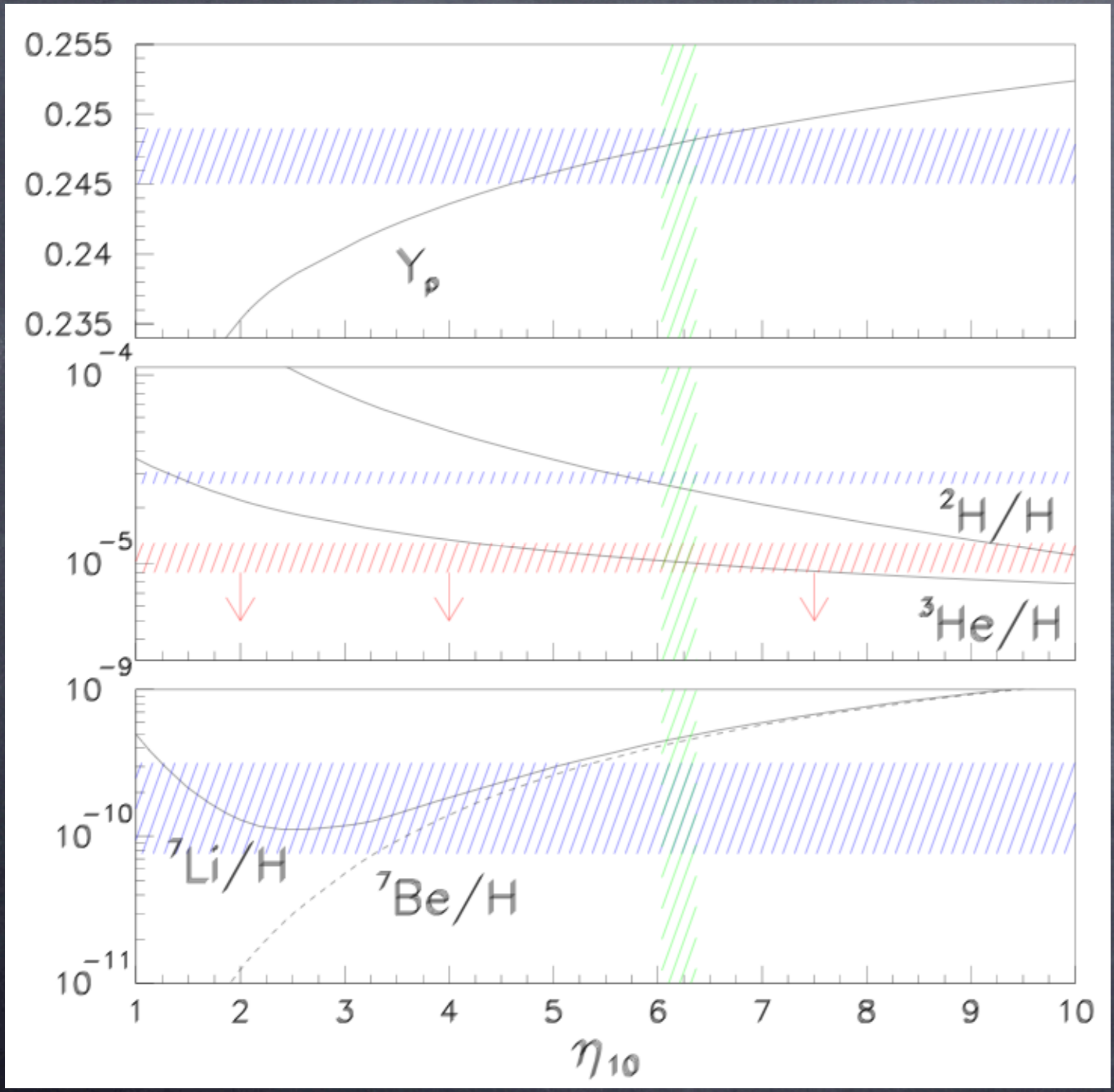
Gamow : Nucléosynthèse primordiale



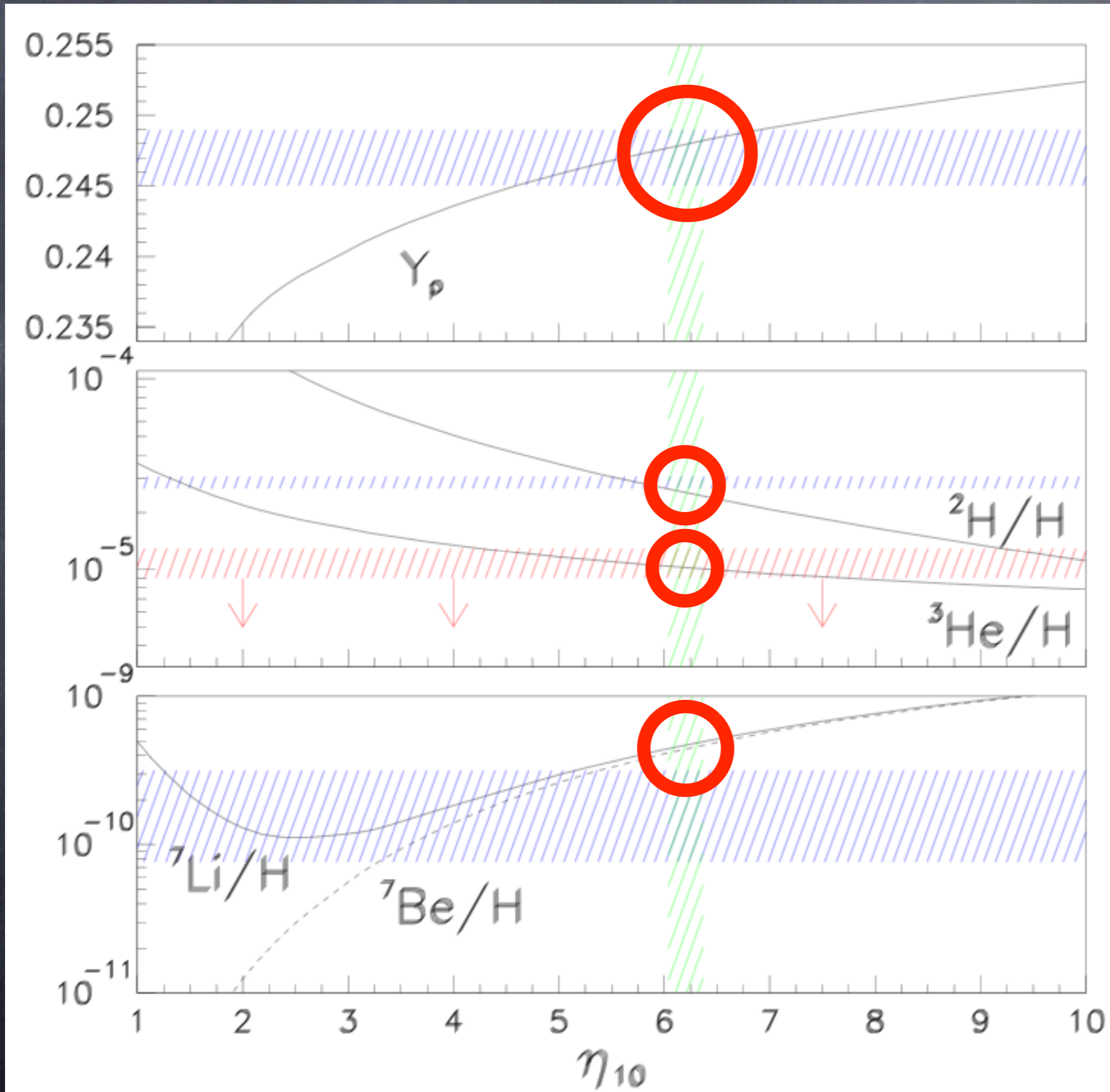
Gamow : Nucléosynthèse primordiale



Gamow : Nucléosynthèse primordiale



Gamow : Nucléosynthèse primordiale



extraordinaire
accord entre
théorie et
mesures !

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.

Gamow : rayonnement fossile

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 7

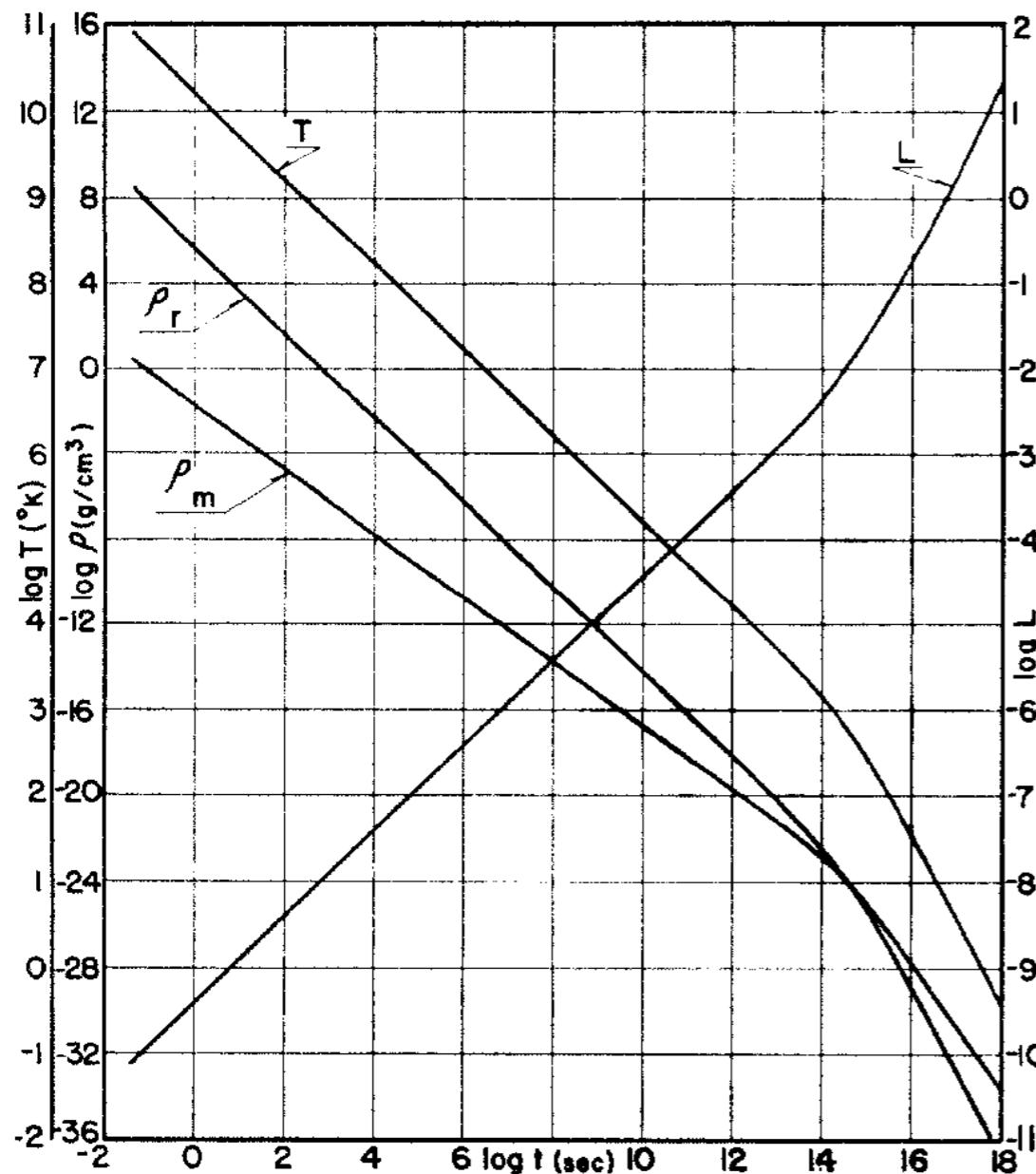
APRIL 1, 1949

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 ρ_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

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** !

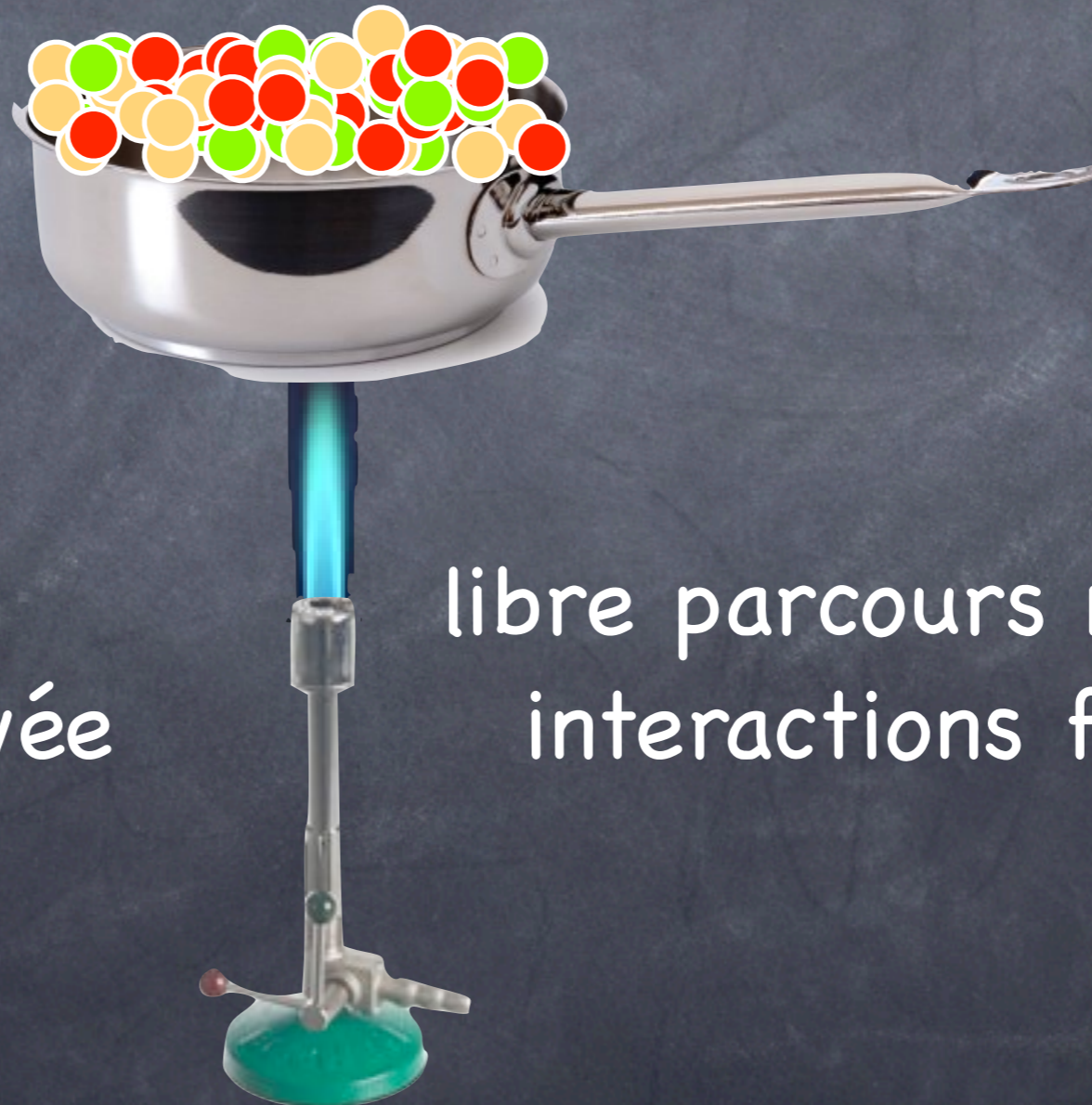
Le rayonnement fossile

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

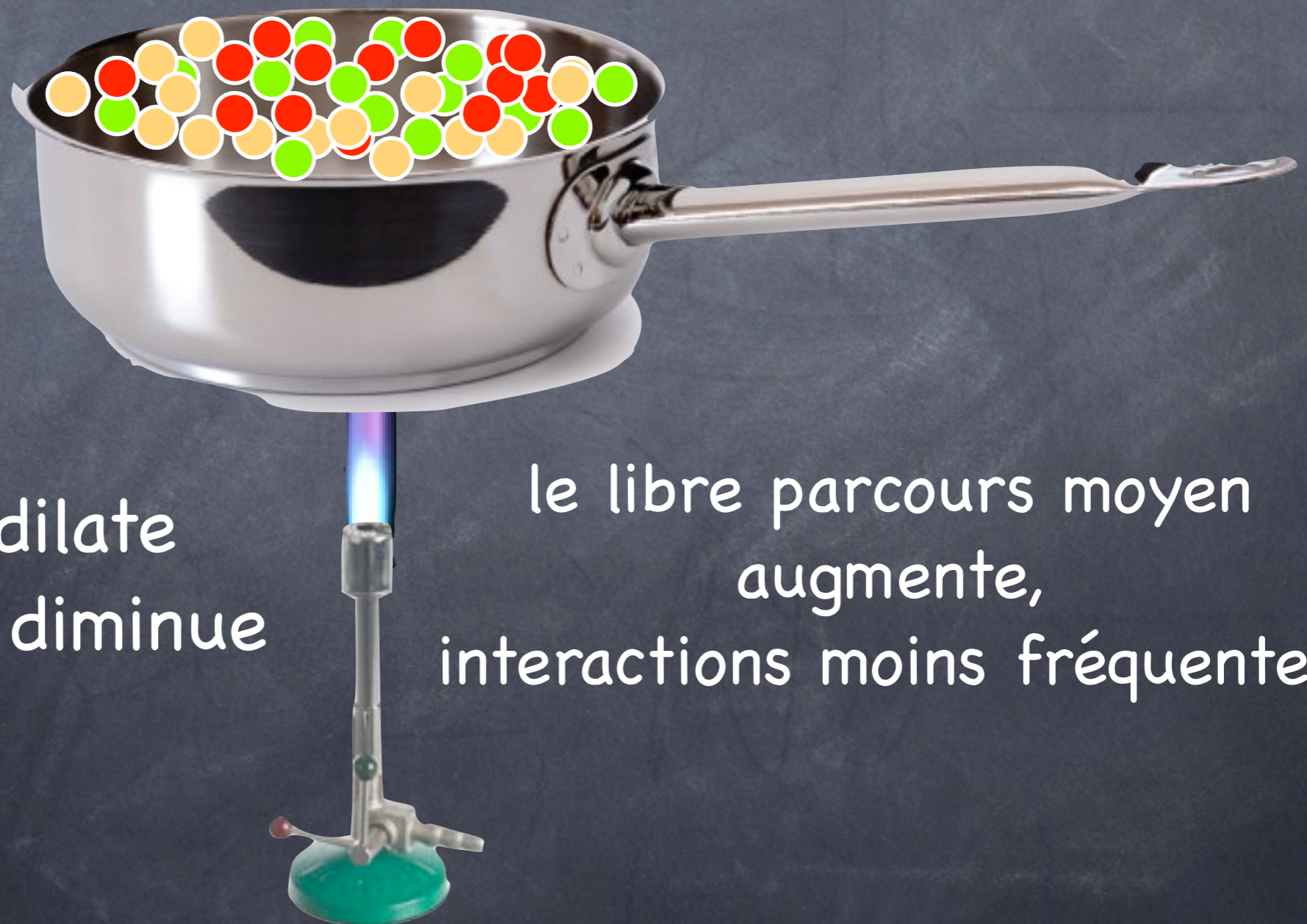
Le rayonnement fossile

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 H

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 $T = \frac{T_0}{1+z}$ donc $T_0 \sim 3 \text{ K}$

Le rayonnement fossile

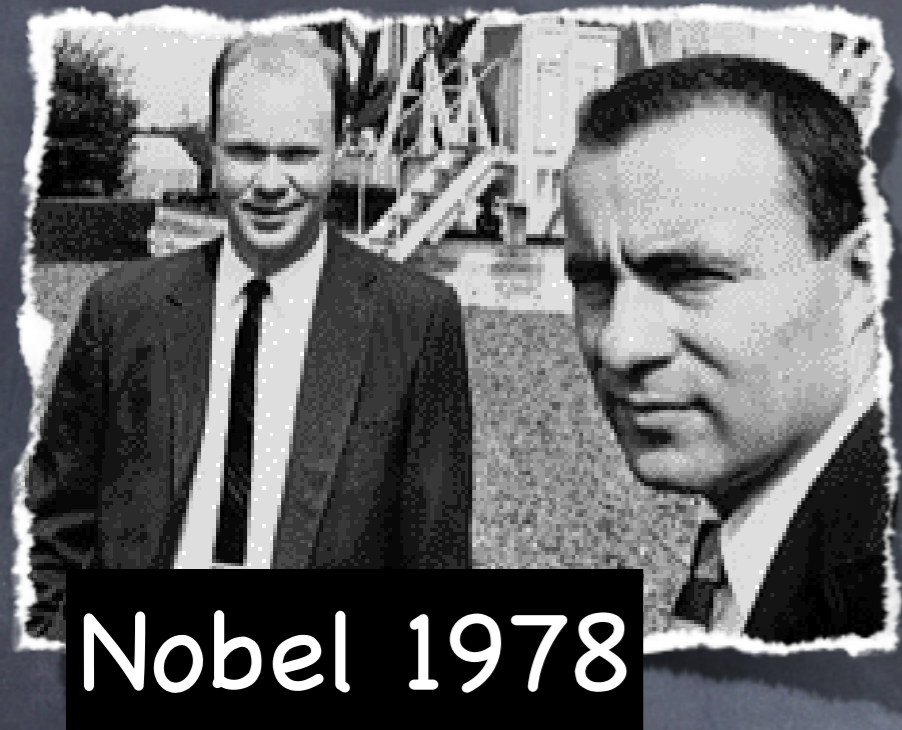
$$t_{\text{dec}} \sim 380\,000 \text{ ans}$$

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

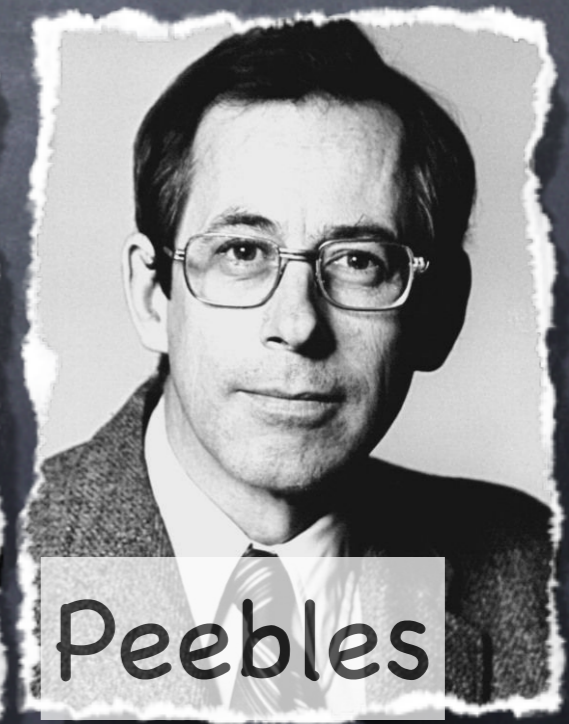
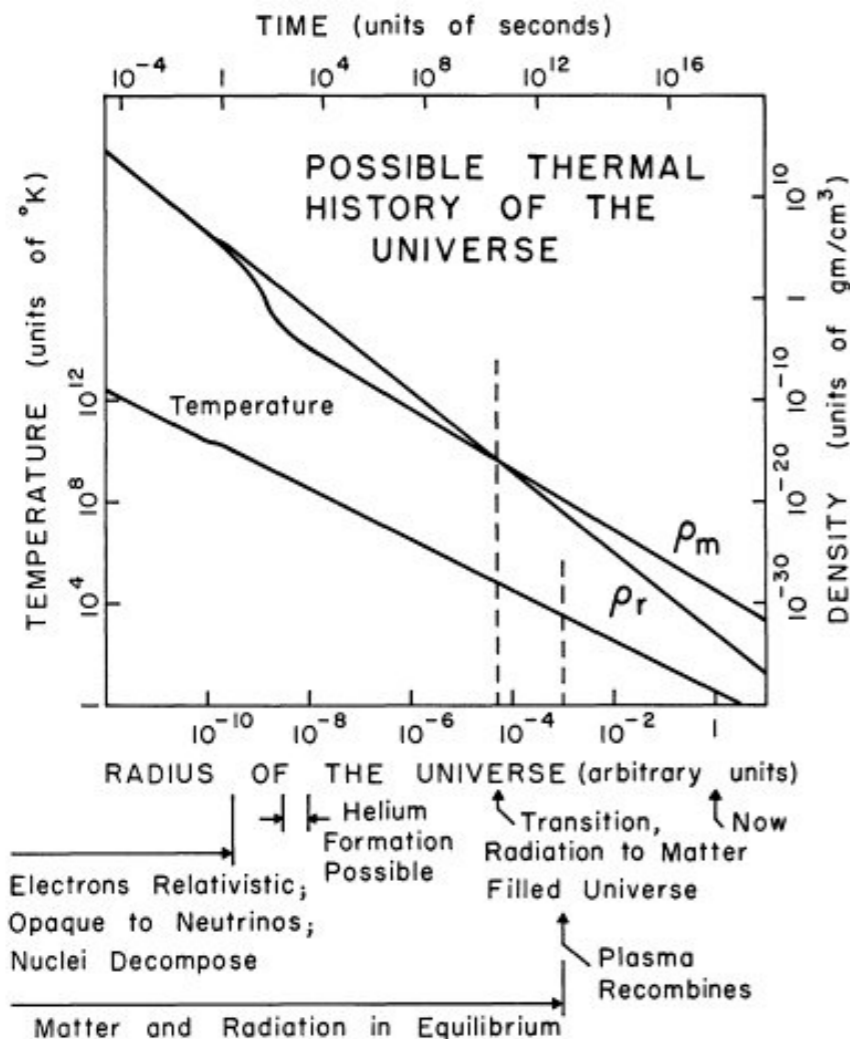
Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5°K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

420

LETTERS TO THE EDITOR

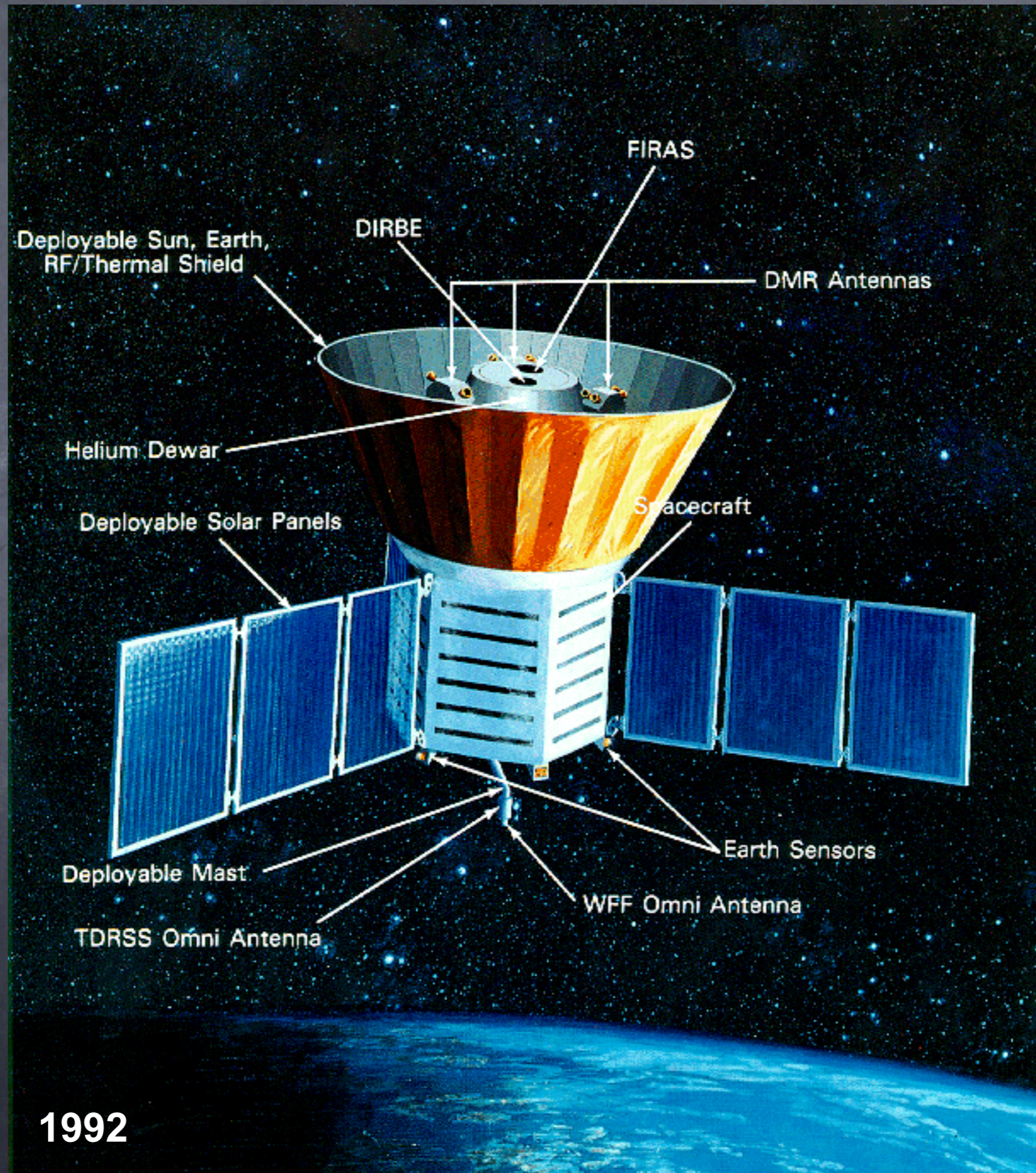
Vol. 142

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.

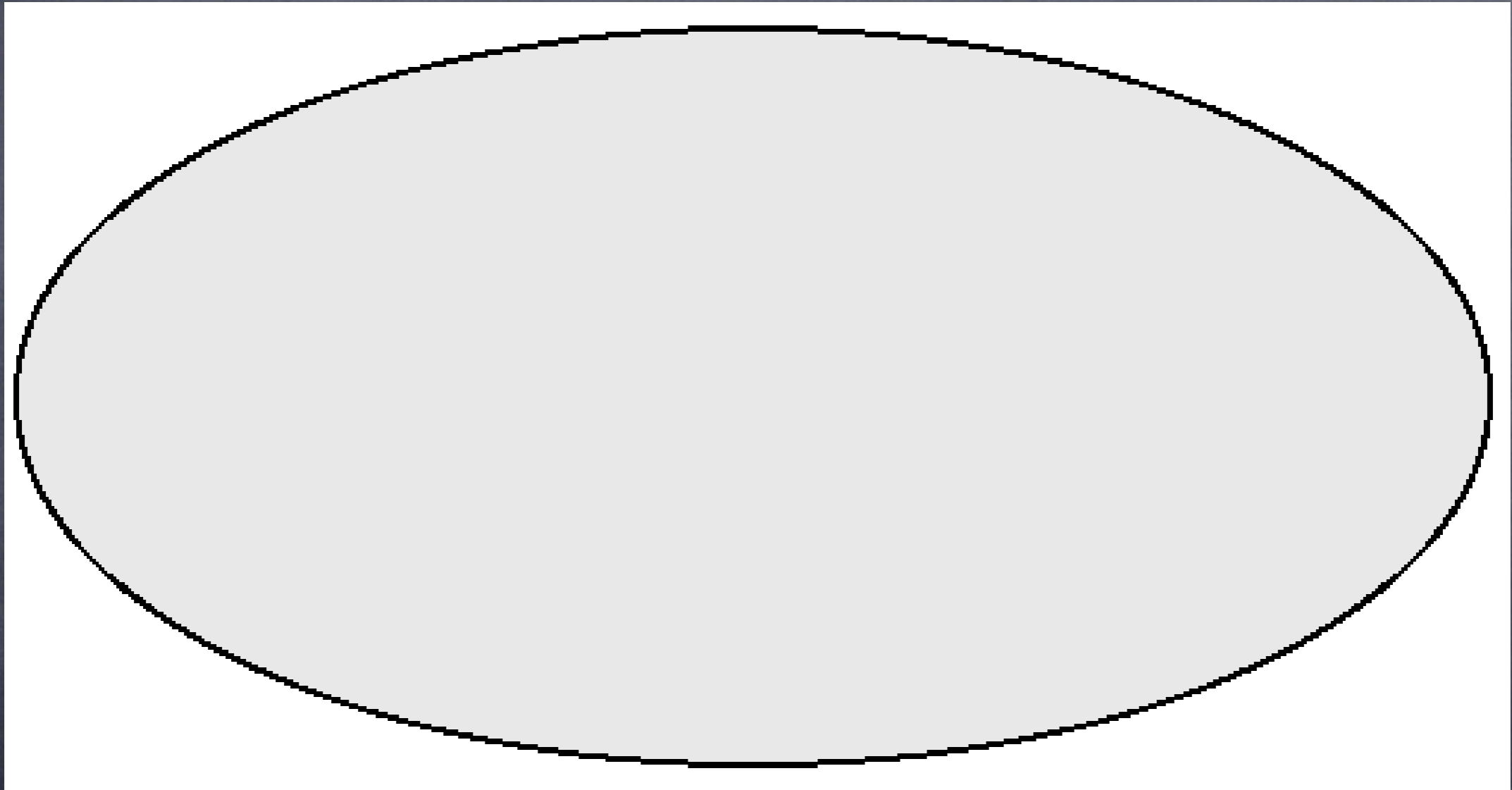


Le rayonnement fossile : COBE 1989-1992

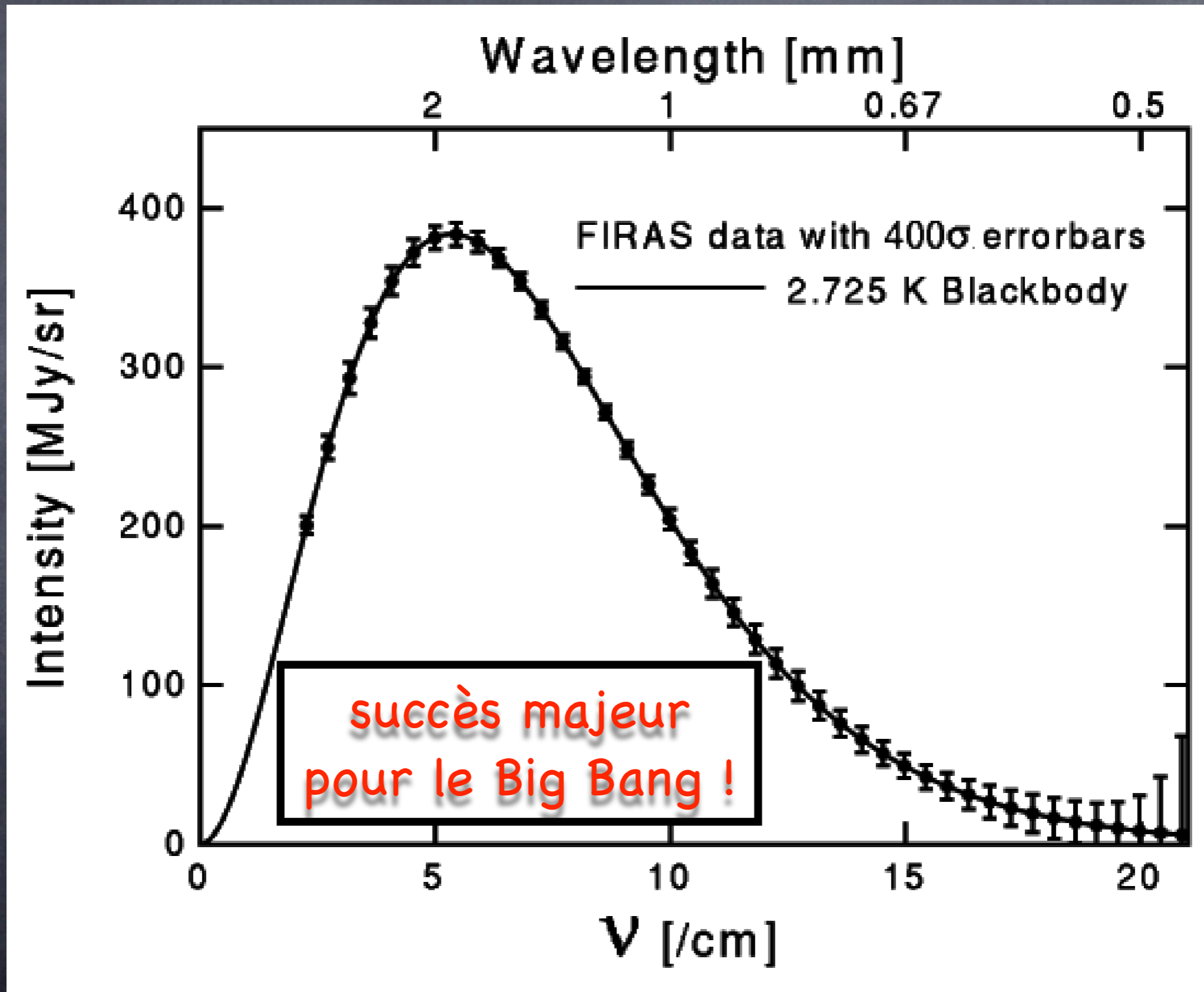
Le rayonnement fossile : COBE 1989-1992



Le rayonnement fossile : COBE 1989-1992



Le rayonnement fossile : COBE 1989-1992



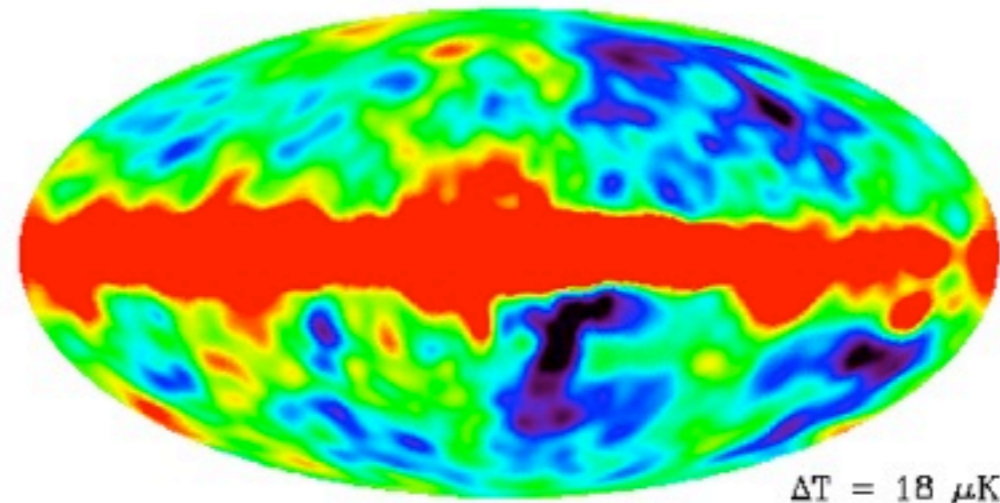
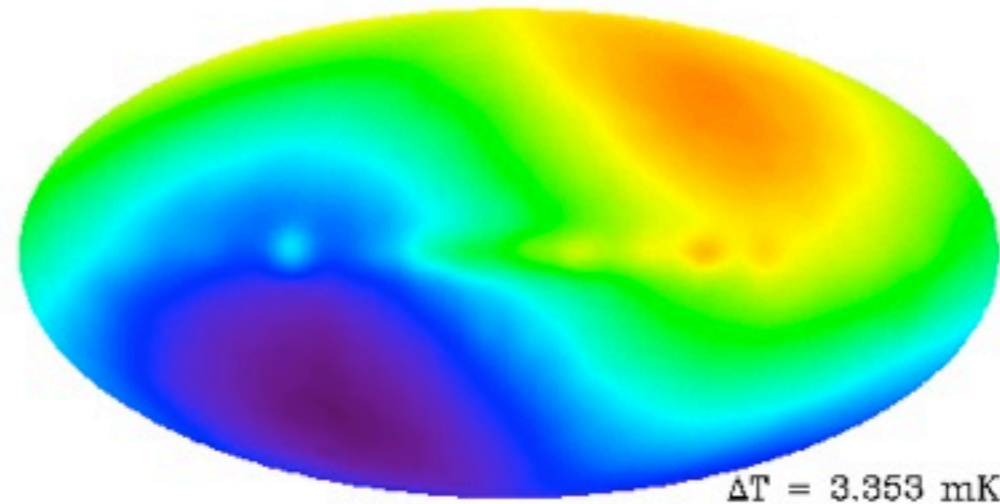
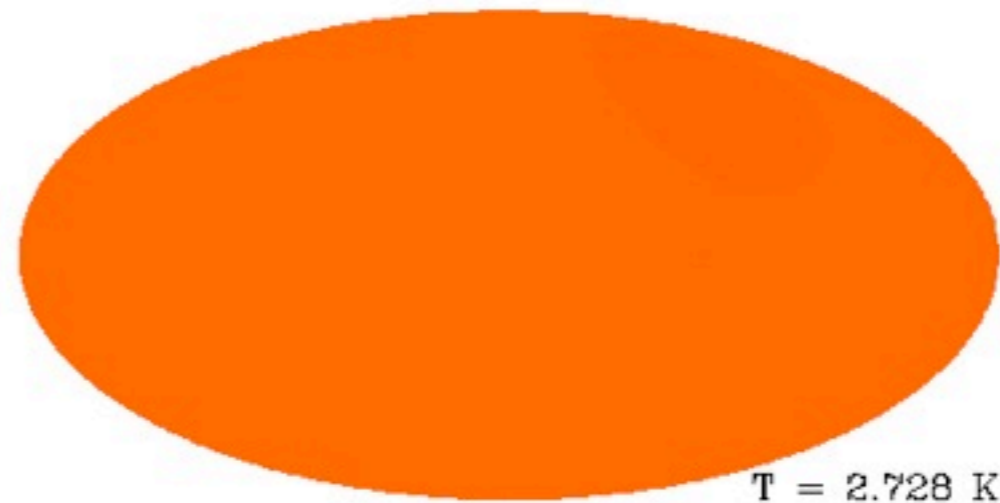
Le rayonnement fossile : COBE 1989-1992

principe
cosmologique
validé !

effet
Doppler

anisotropies ?

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 1/100\,000$$



Les anisotropies du rayonnement fossile

fluctuations de température dans le rayonnement fossile dues à des fluctuations de densité qui formeront les amas, les galaxies, les étoiles...

Les anisotropies du rayonnement fossile

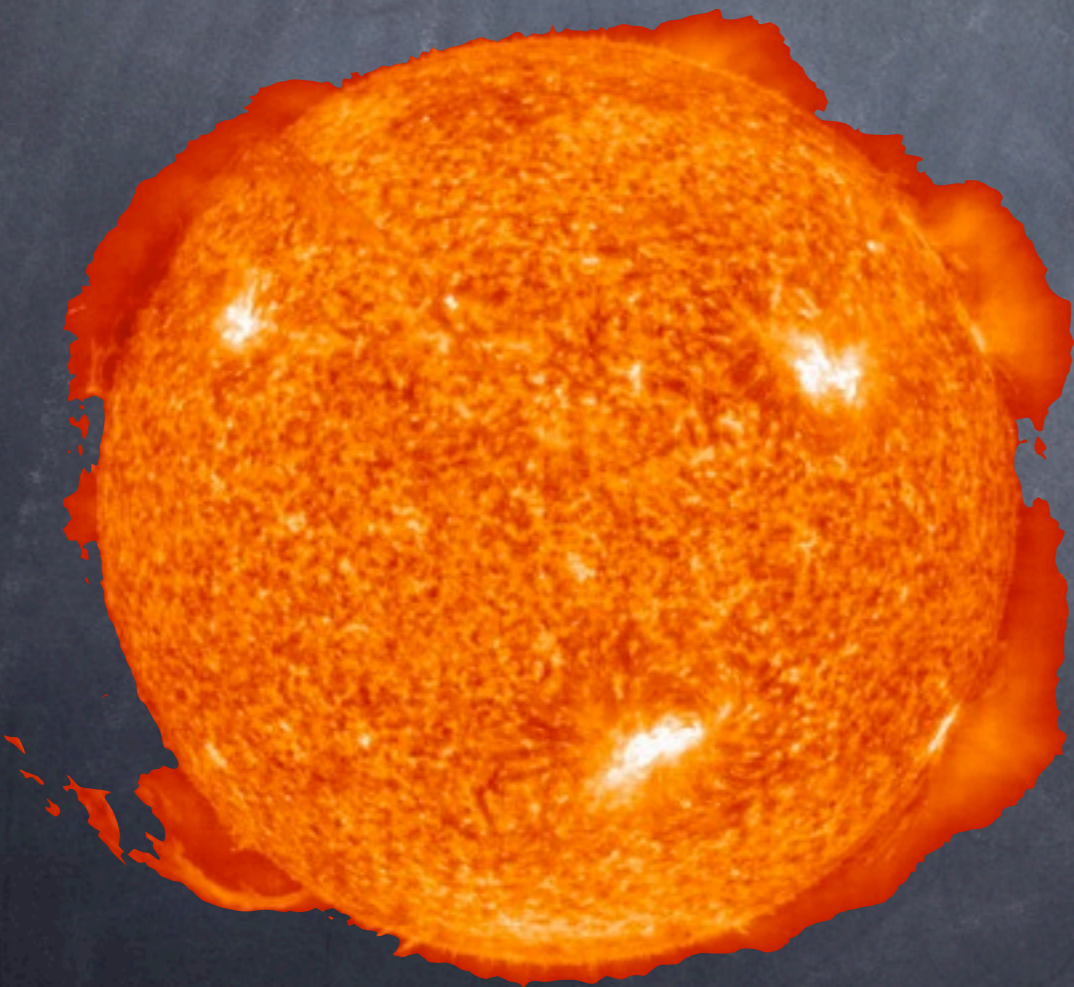
fluctuations de température dans le rayonnement fossile dues à des **fluctuations de densité** qui formeront les amas, les galaxies, les étoiles...



Les anisotropies du rayonnement fossile

l'étude de la carte du ciel du rayonnement fossile nous renseignera sur les mécanismes qui en sont responsables

la lumière que nous recevons du soleil provient de sa **surface** exclusivement
l'étude de sa surface nous renseigne sur les mécanismes internes = **oscillations** dans notre cas !



Les anisotropies du rayonnement fossile

Les anisotropies du rayonnement fossile



surdensité

Les anisotropies du rayonnement fossile

effondrement
T augmente



surdensité

Les anisotropies du rayonnement fossile

effondrement
T augmente

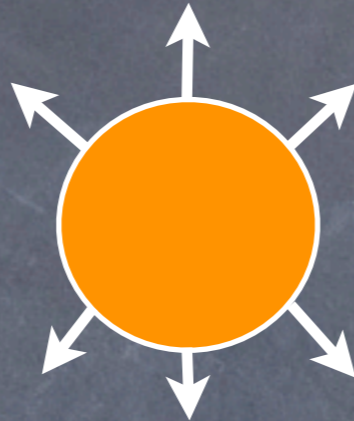


surdensité

la pression
augmente,
la perturbation
rebondit

Les anisotropies du rayonnement fossile

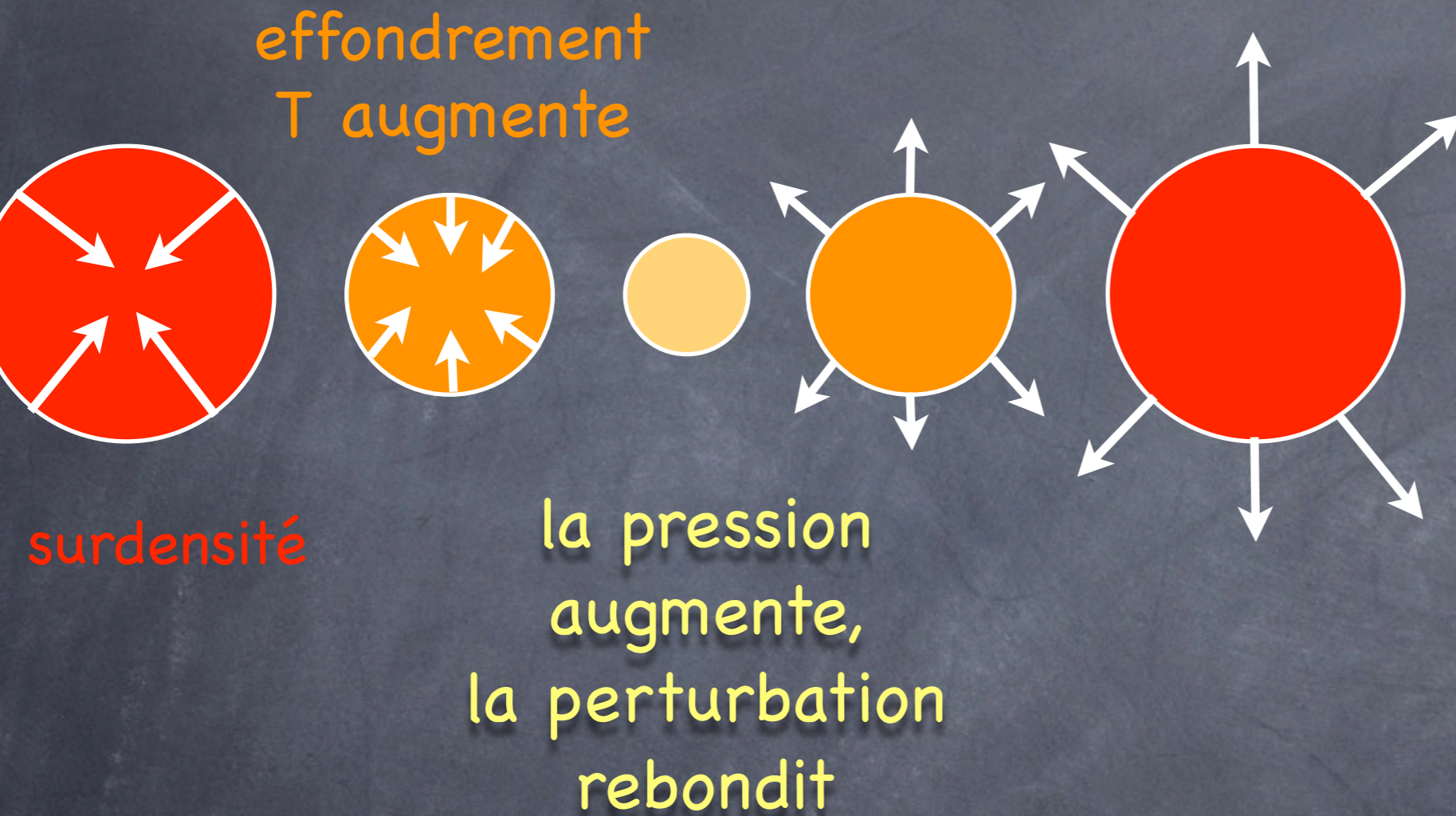
effondrement
T augmente



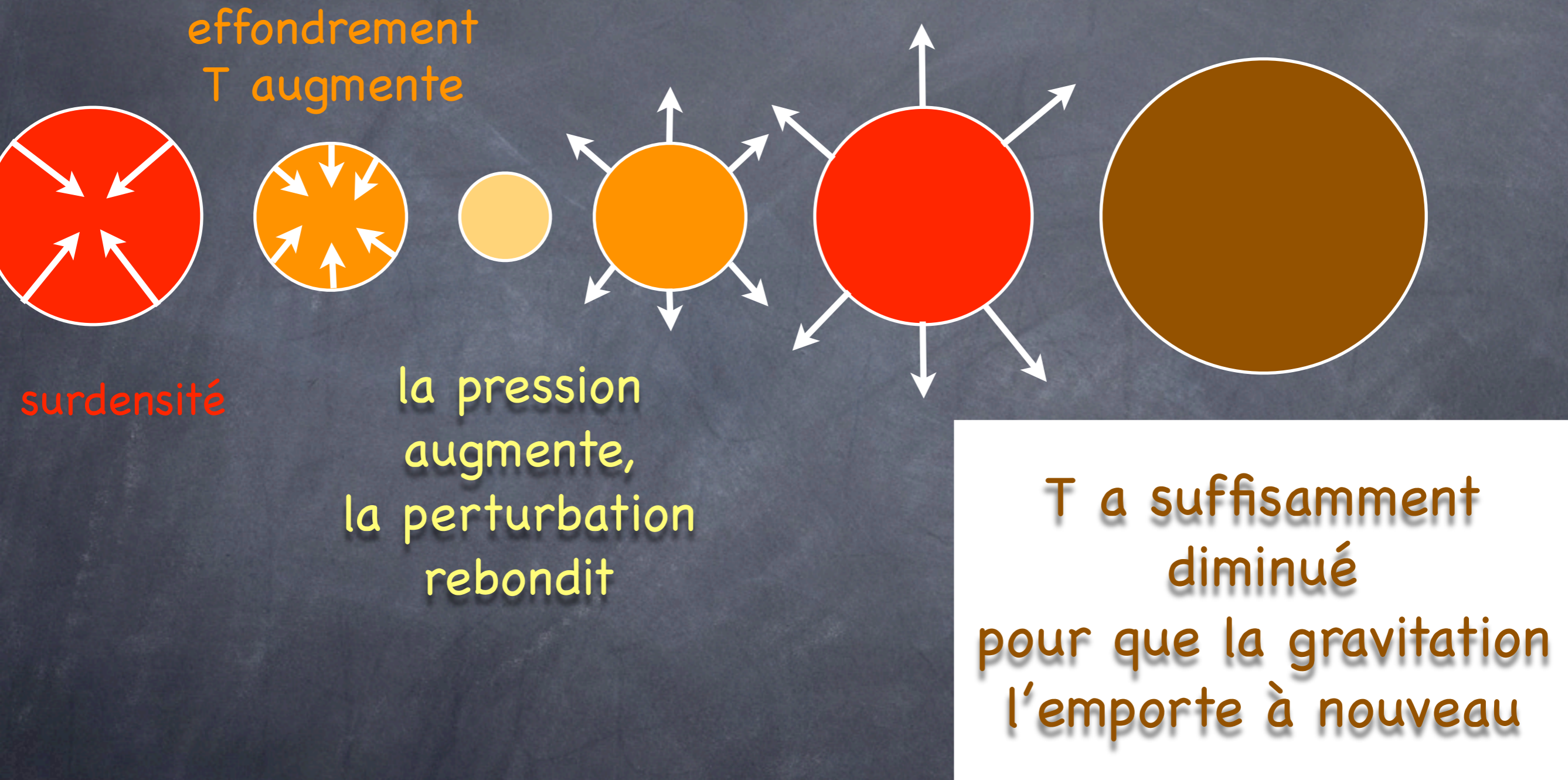
surdensité

la pression
augmente,
la perturbation
rebondit

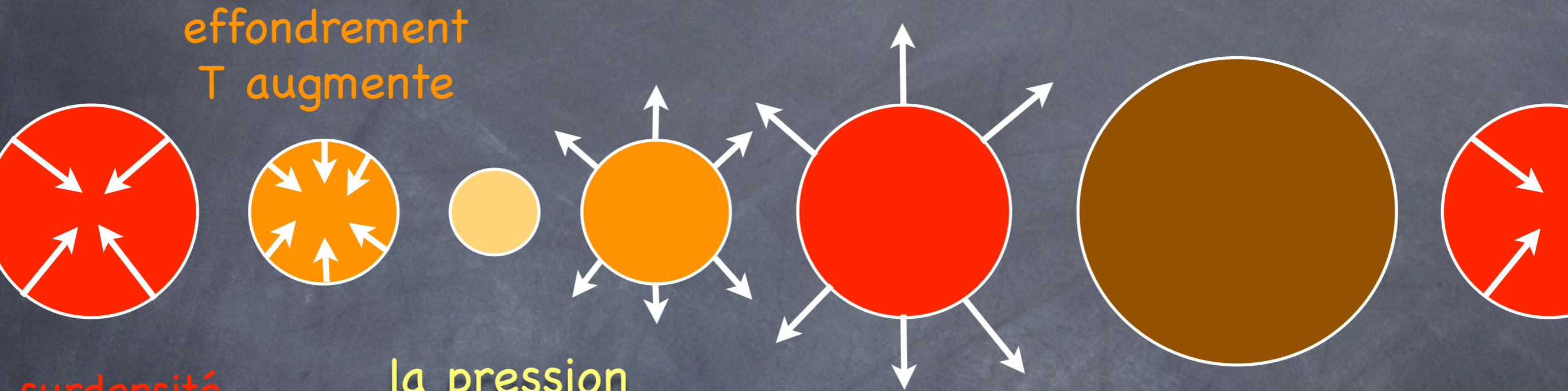
Les anisotropies du rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile



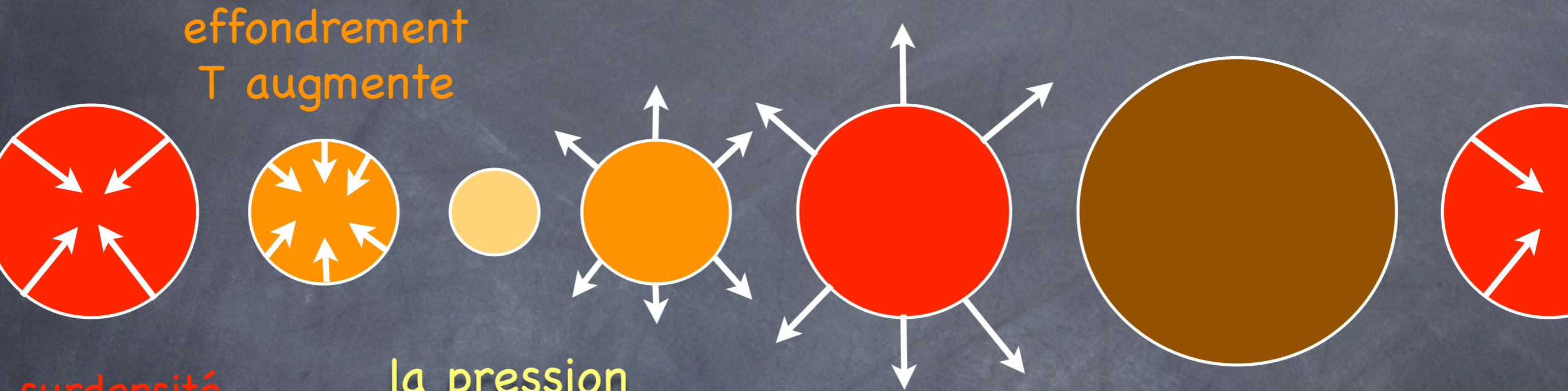
surdensité

effondrement
T augmente

la pression
augmente,
la perturbation
rebondit

T a suffisamment
diminué
pour que la gravitation
l'emporte à nouveau

Les anisotropies du rayonnement fossile



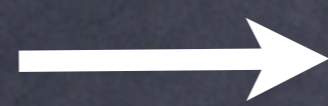
surdensité

effondrement
T augmente

la pression
augmente,
la perturbation
rebondit

T a suffisamment
diminué
pour que la gravitation
l'emporte à nouveau

mécanisme possible
jusqu'au découplage



après le découplage, rien
n'empêche l'effondrement

Bilan sur les anisotropies

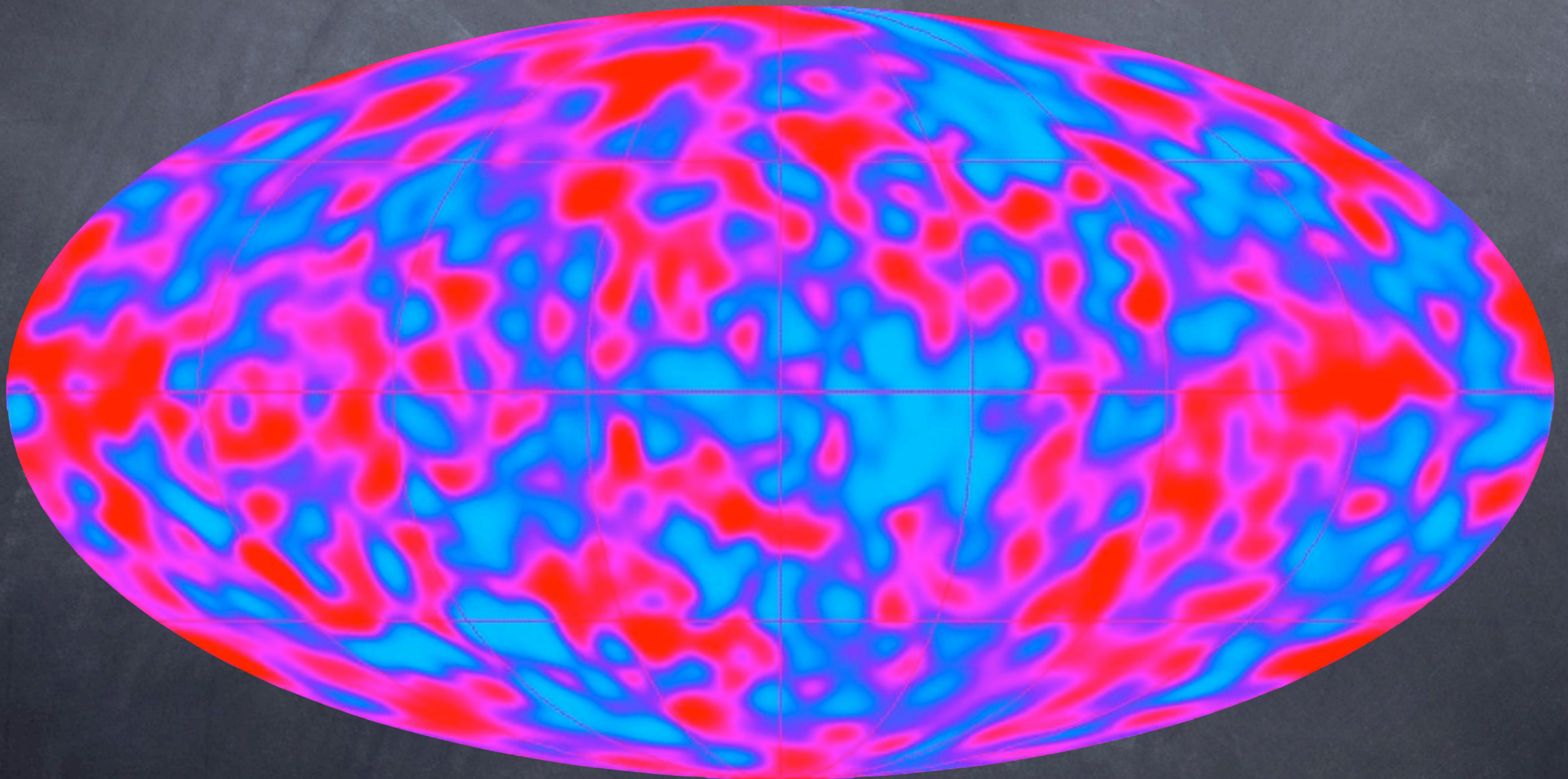
le fluide cosmique devient **transparent à la lumière**
380 000 ans après le Big-Bang

ce fluide n'est pas homogène, il contient des **grumeaux**
qui vont osciller sous l'effet de la gravitation et de la
pression

ces fluctuations de densité vont se voir dans des
fluctuations de température du rayonnement fossile qui
devront aussi présenter des pics et des creux

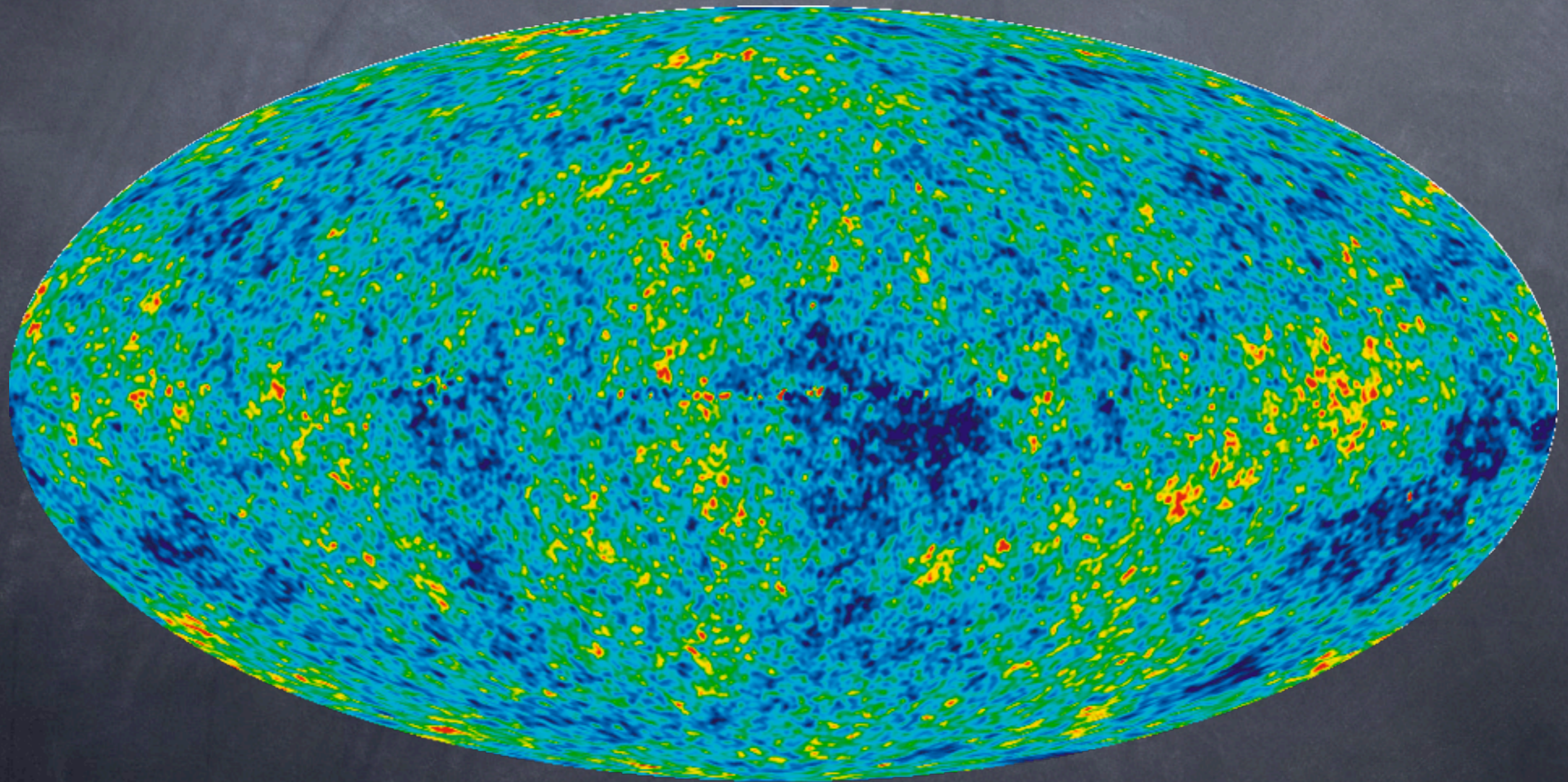
Les anisotropies du rayonnement fossile

Carte de COBE en 1992 (4 ans de données)



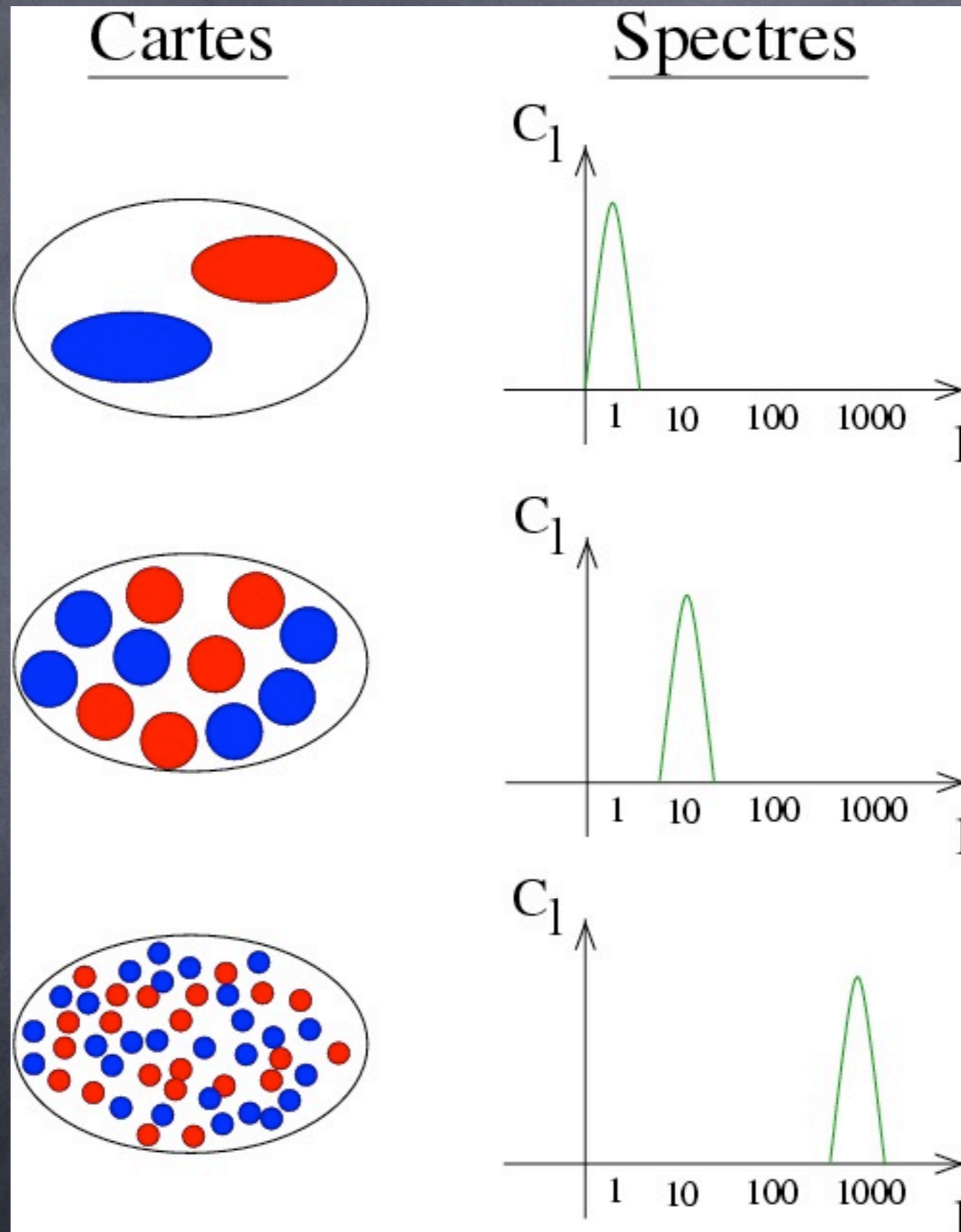
Les anisotropies du rayonnement fossile

Carte de WMAP en 2008 (5 ans de données)

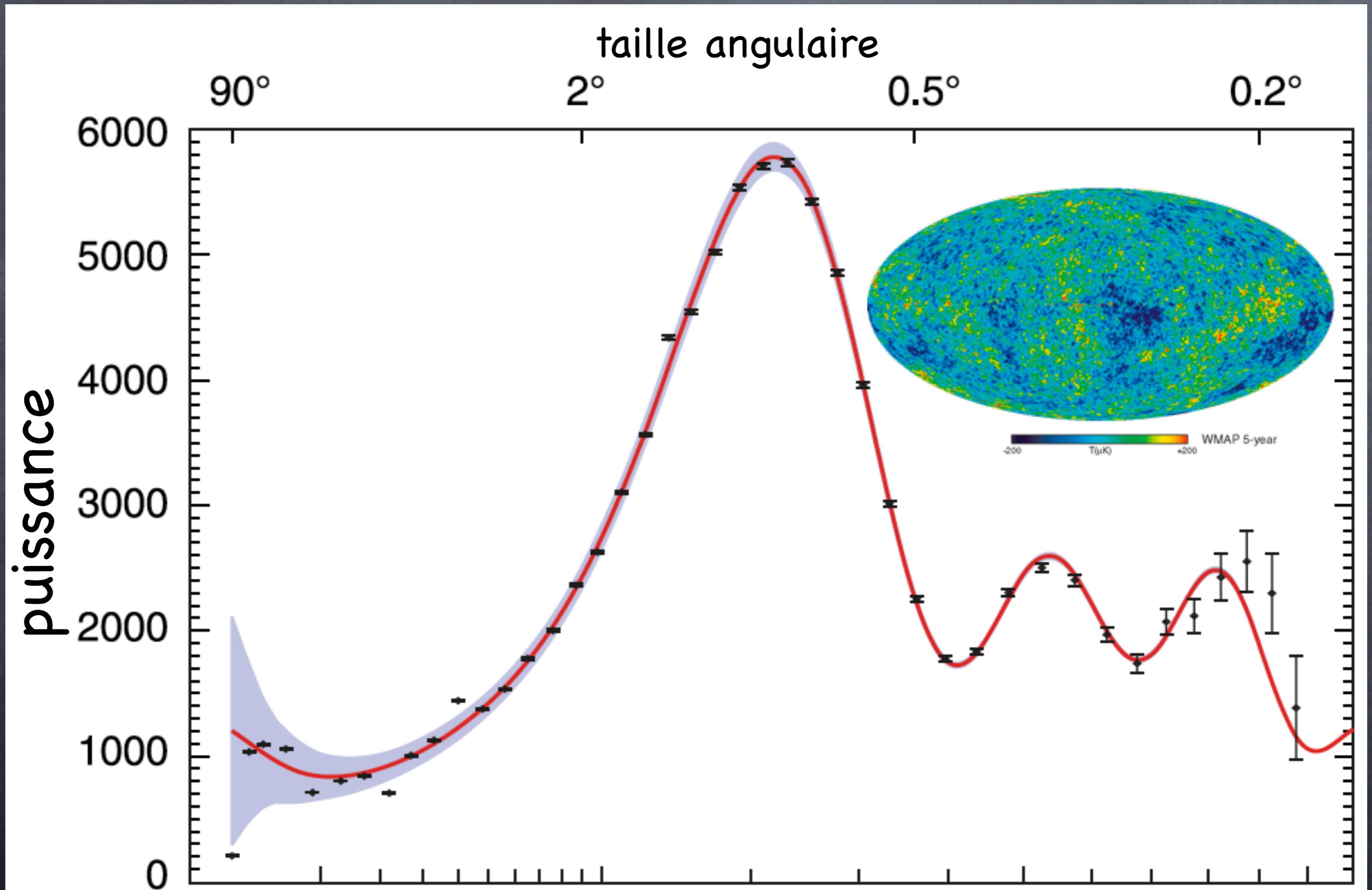


Les anisotropies du rayonnement fossile

comptage des structures selon leur taille



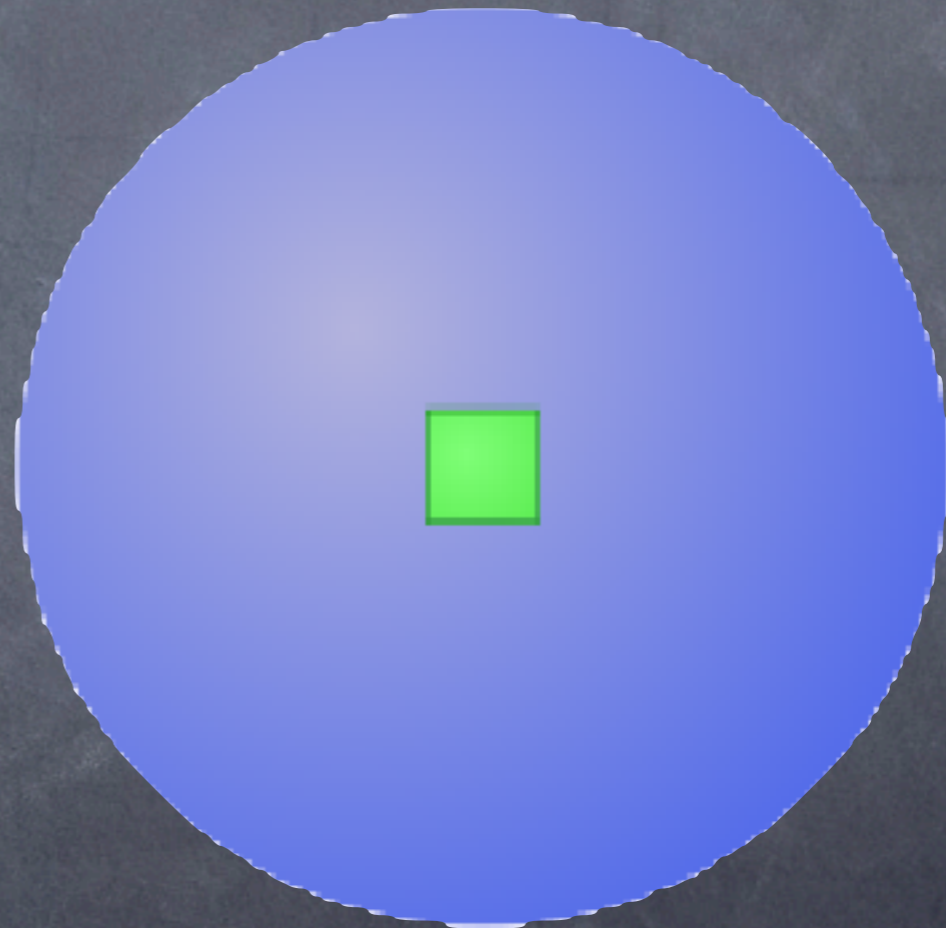
Les anisotropies du rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile

redshift de 1100 : très grande distance, possibilité de
sonder la courbure de l'Univers

on ne se rend pas
compte de la courbure
de la Terre sur
quelques mètres

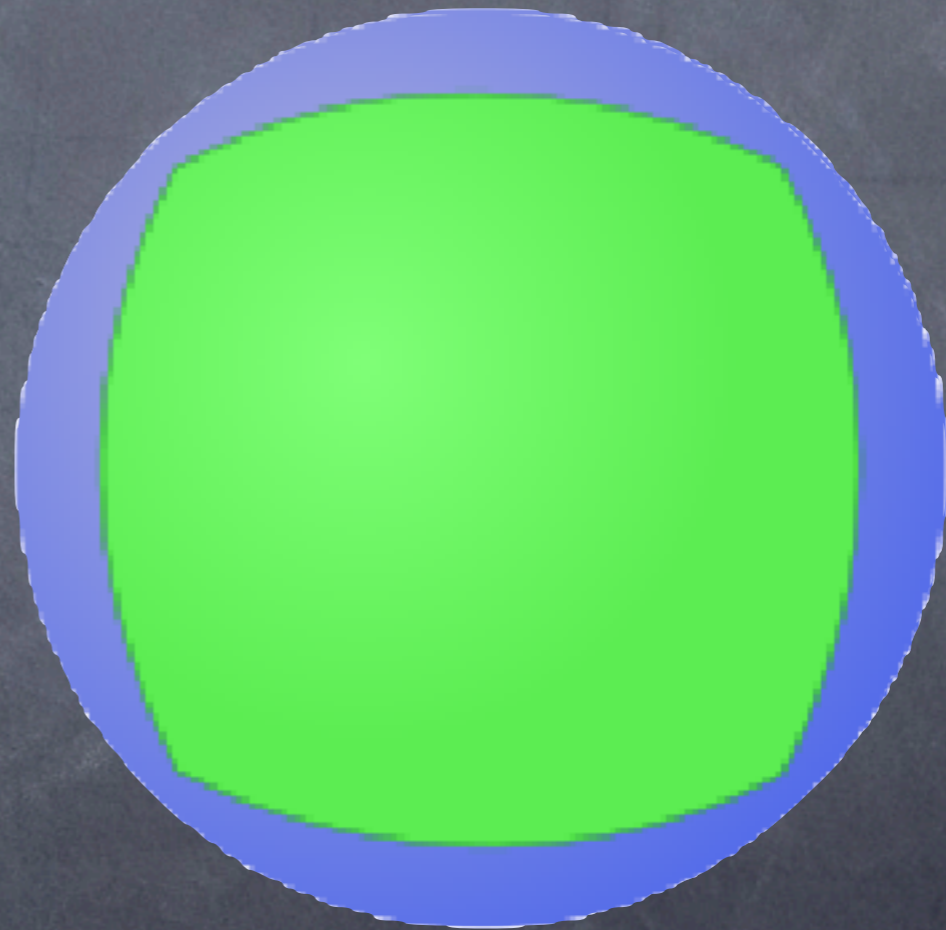


sonder la courbure : sensibilité à $\frac{\Omega_m + \Omega_\Lambda}{(\Omega_\kappa + 1)}$

Les anisotropies du rayonnement fossile

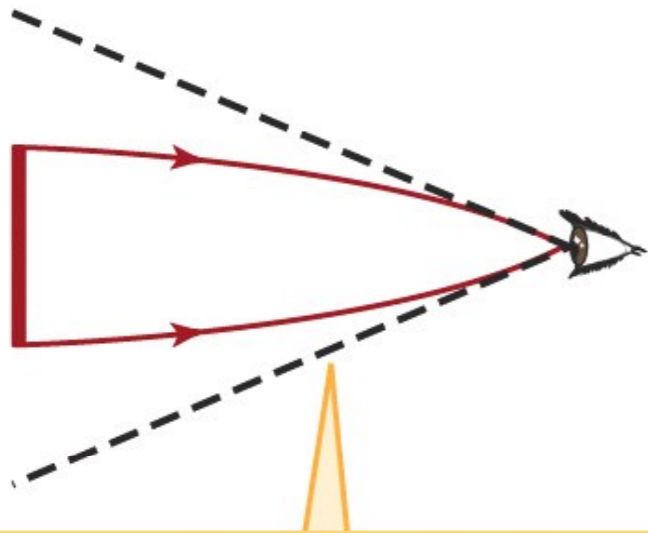
redshift de 1100 : très grande distance, possibilité de
sonder la courbure de l'Univers

on ne se rend pas
compte de la courbure
de la Terre sur
quelques mètres

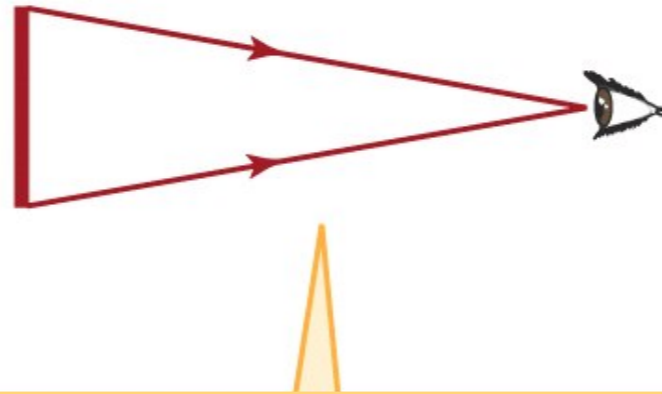


sonder la courbure : sensibilité à $\frac{\Omega_m + \Omega_\Lambda}{(\Omega_\kappa + 1)}$

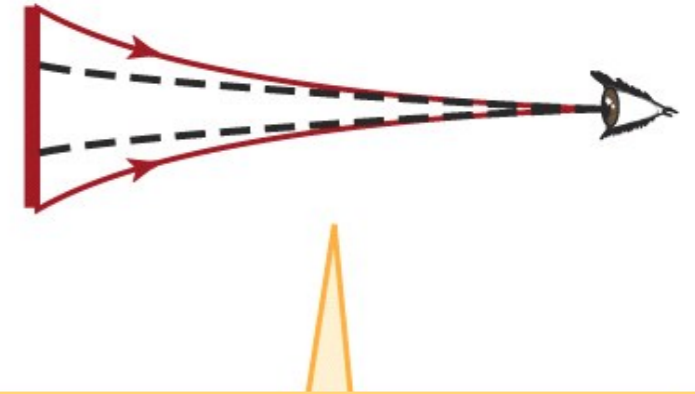
Les anisotropies du rayonnement fossile



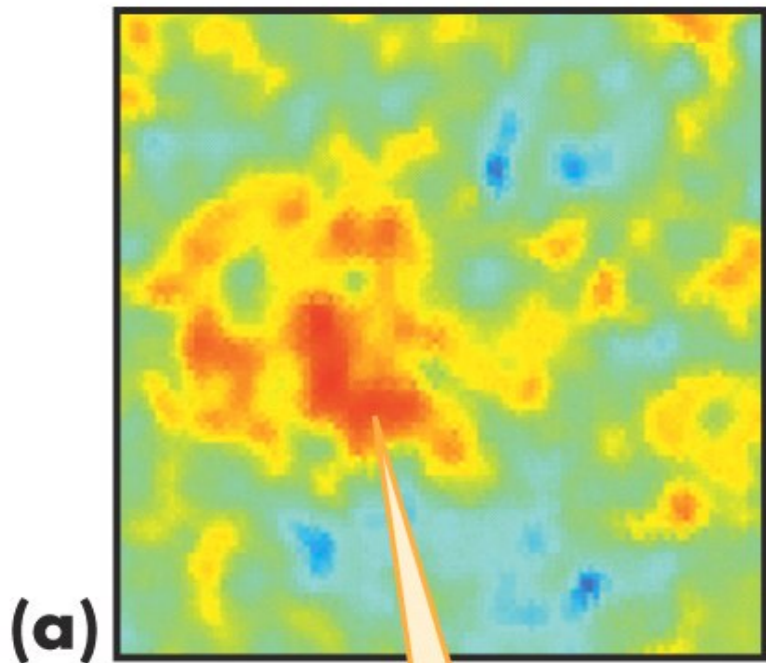
univers fermé : les rayons lumineux sont "bombés", élargis...



univers plat : les rayons lumineux ne sont pas déformés...

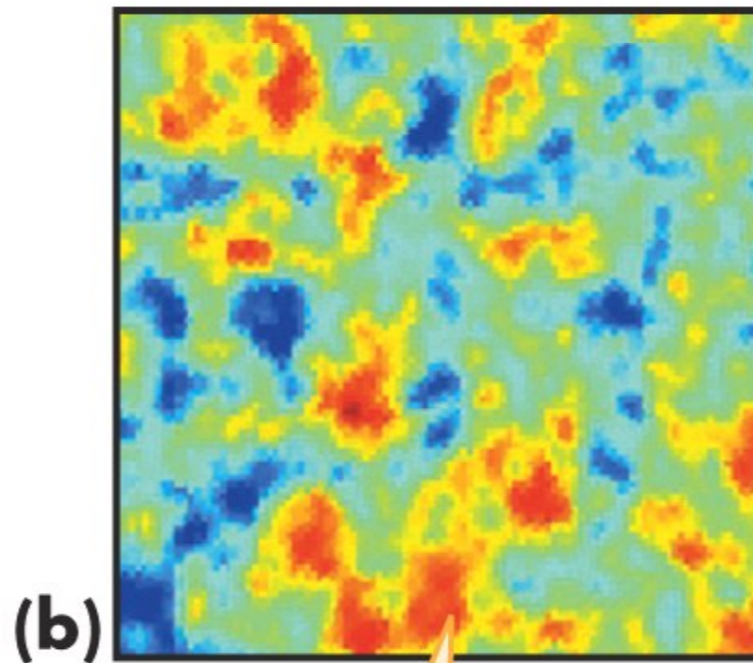


univers ouvert : les rayons lumineux sont amincis...



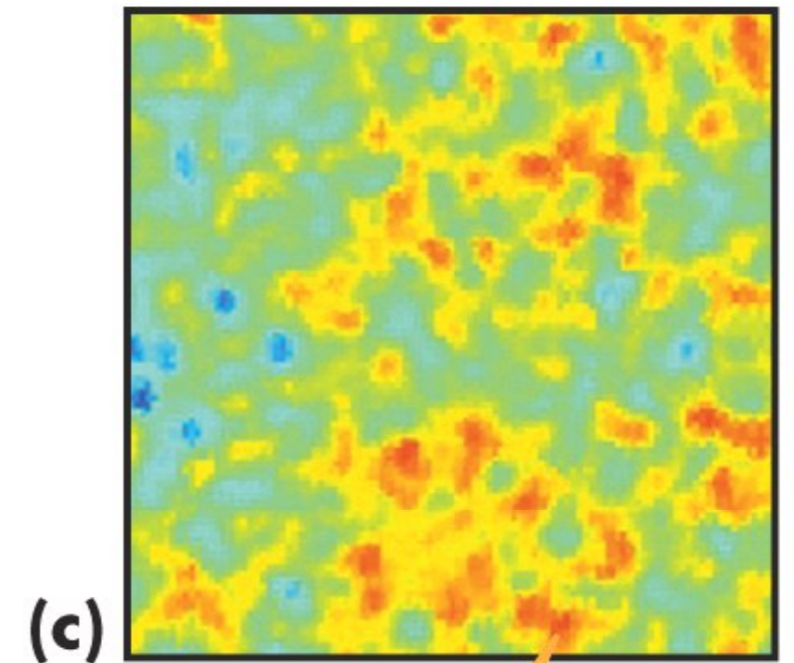
(a)

les structures paraissent plus grandes



(b)

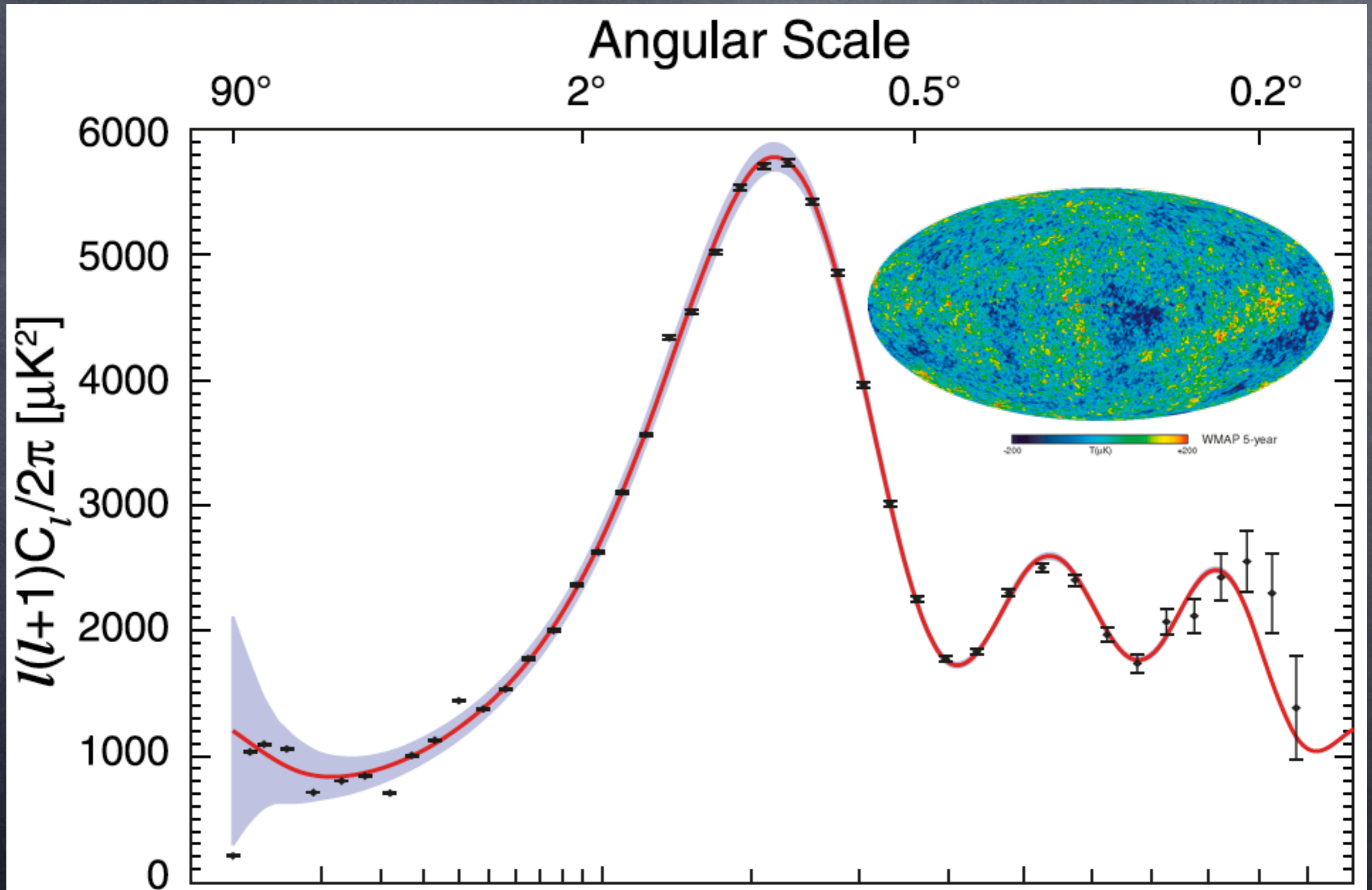
les structures sont vues avec leur taille réelle



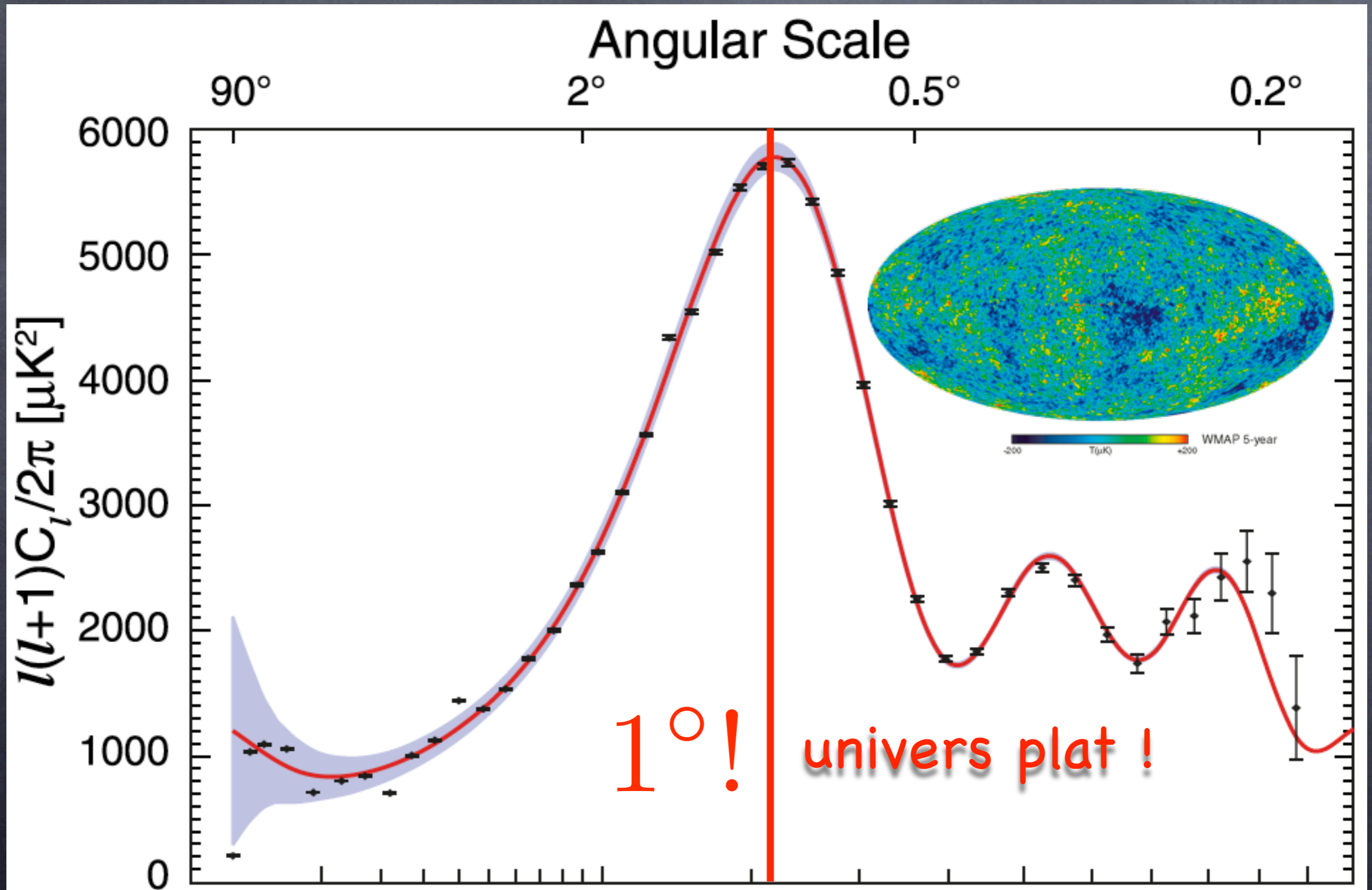
(c)

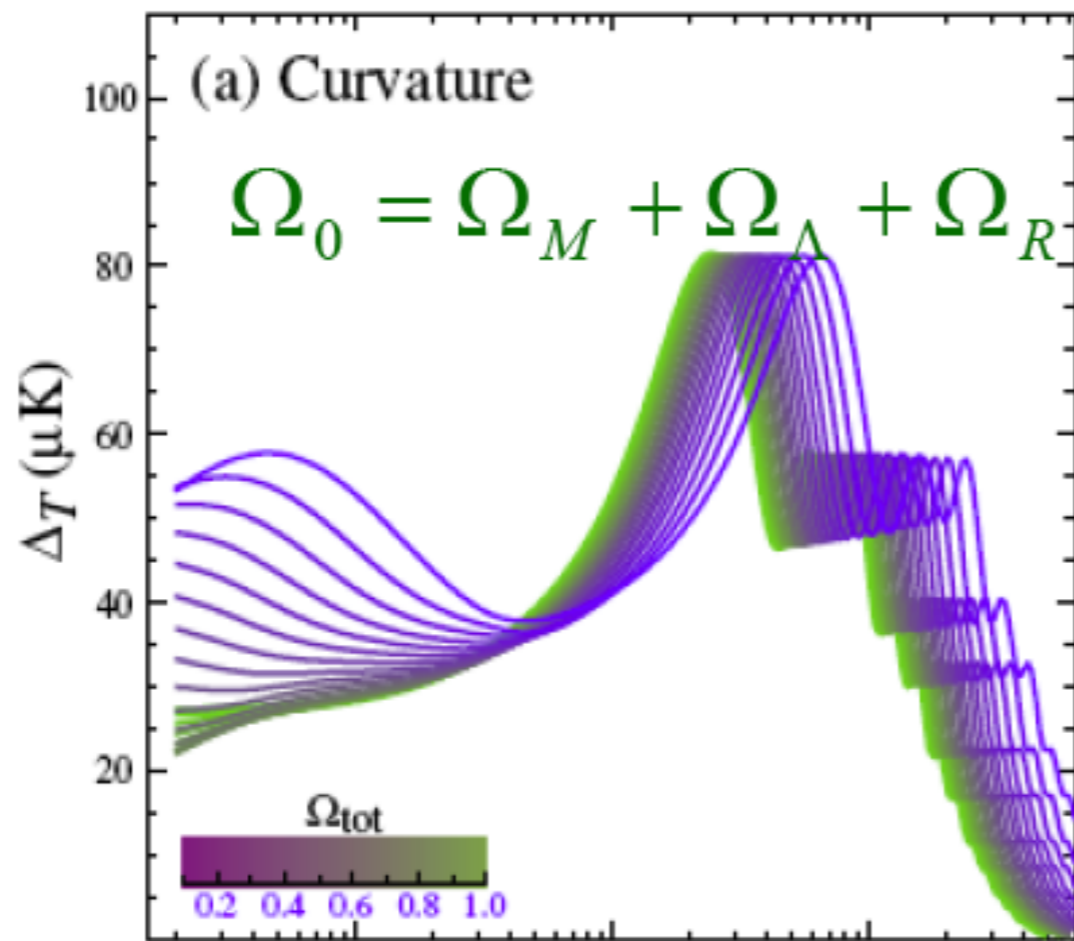
les structures paraissent plus petites

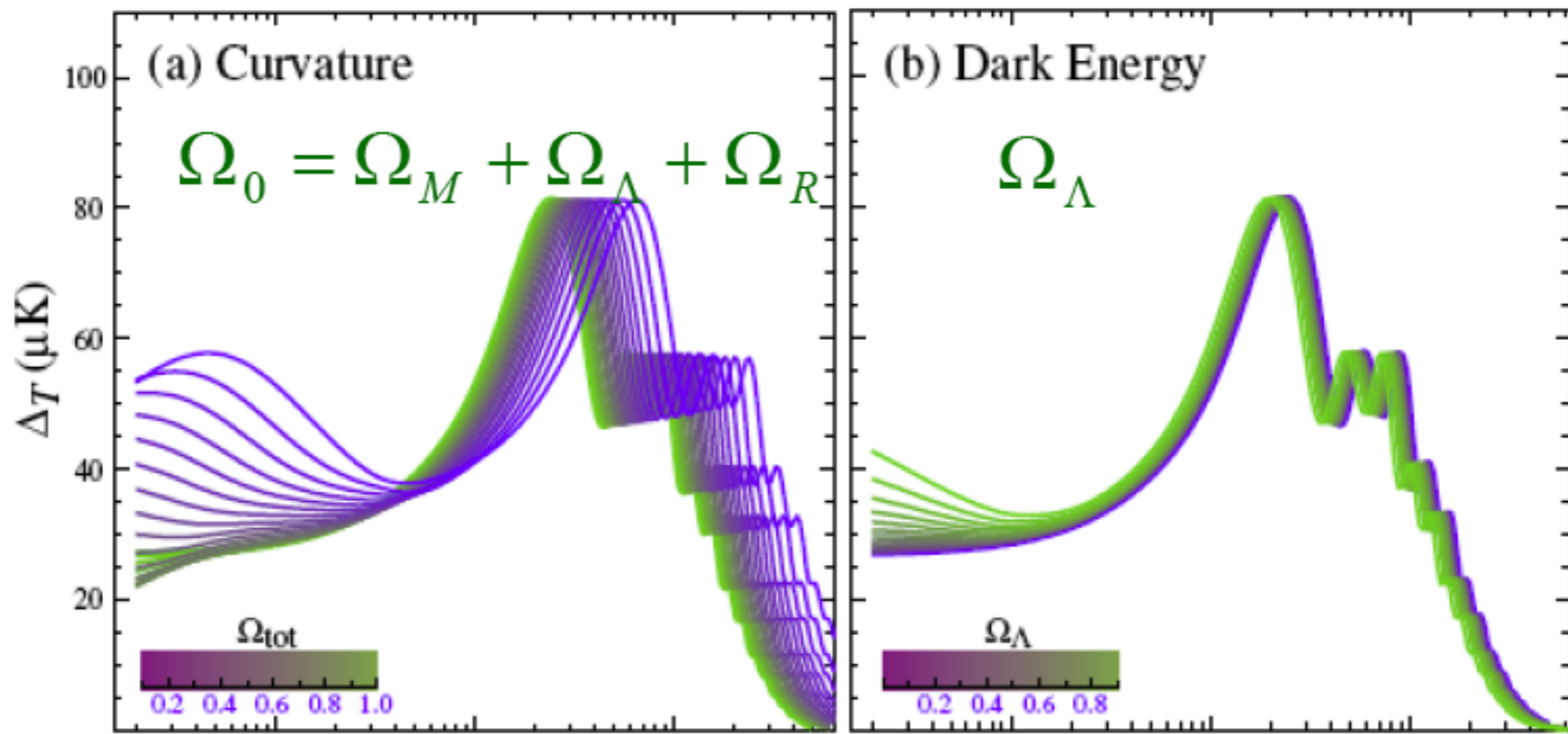
Les anisotropies du rayonnement fossile

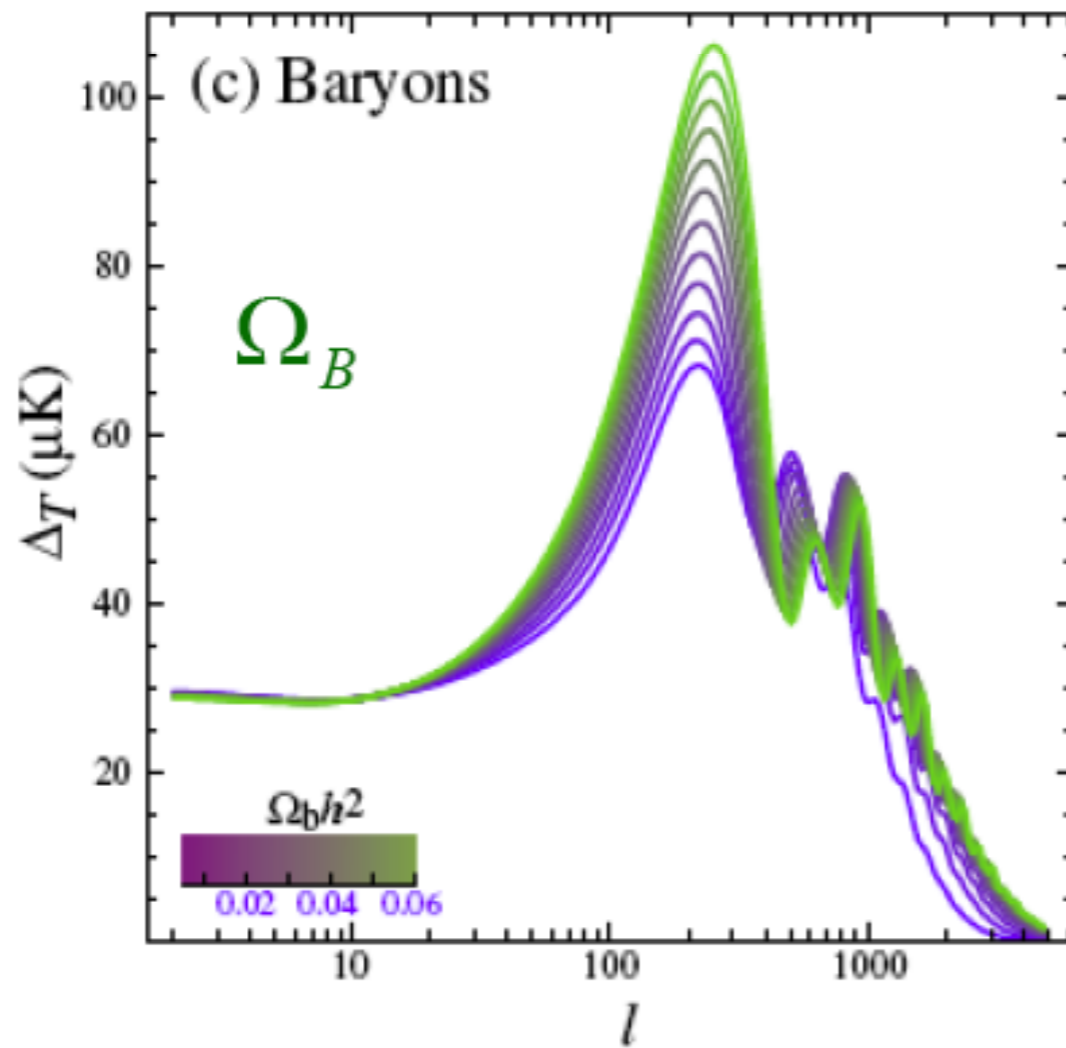
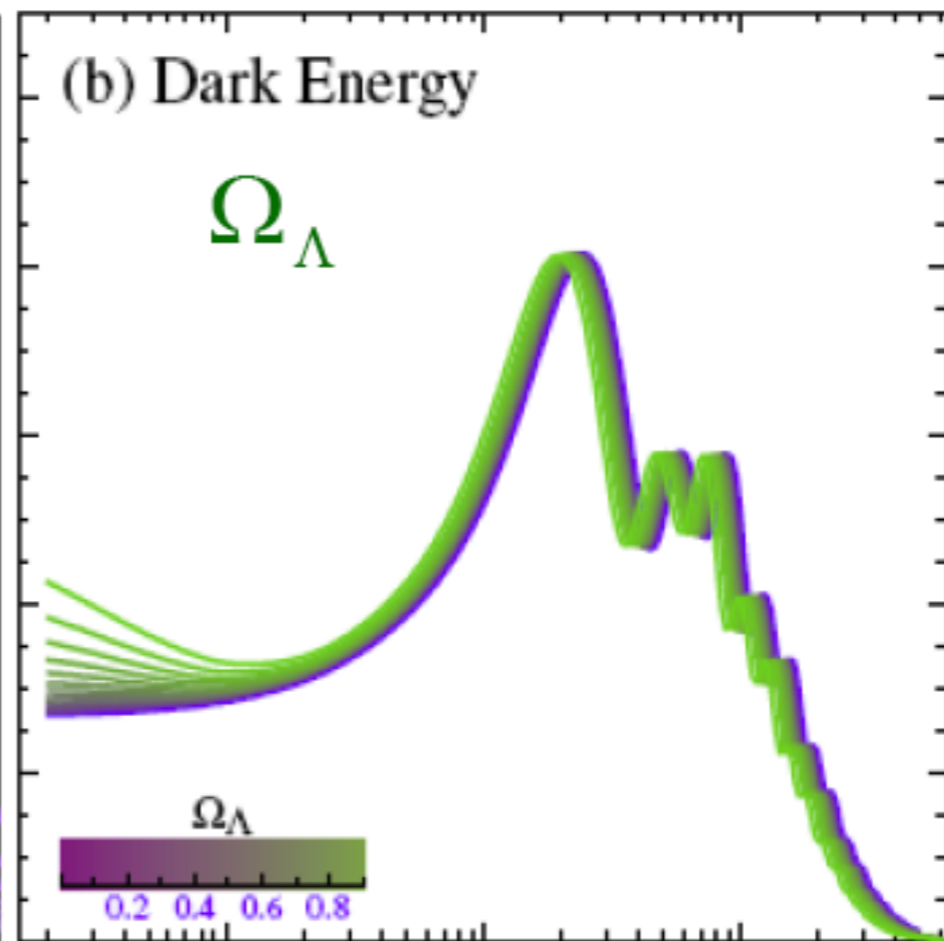
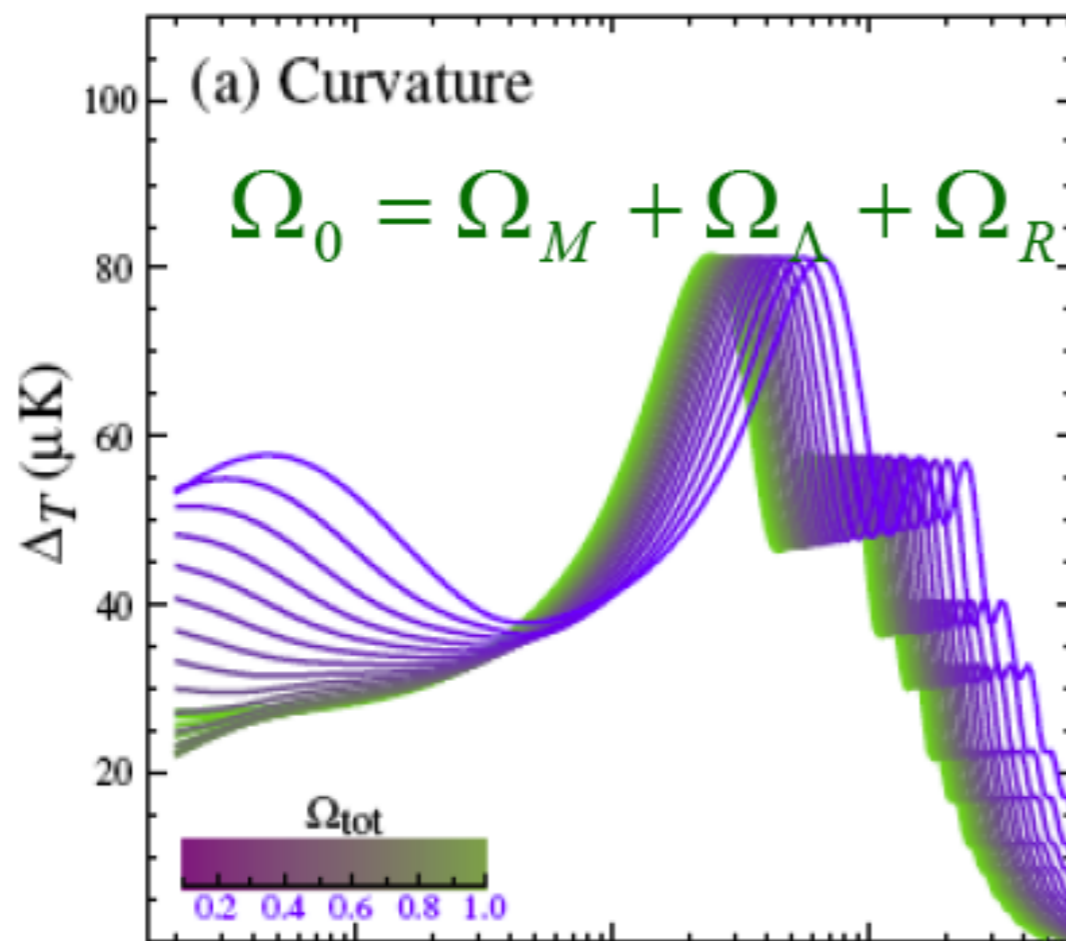


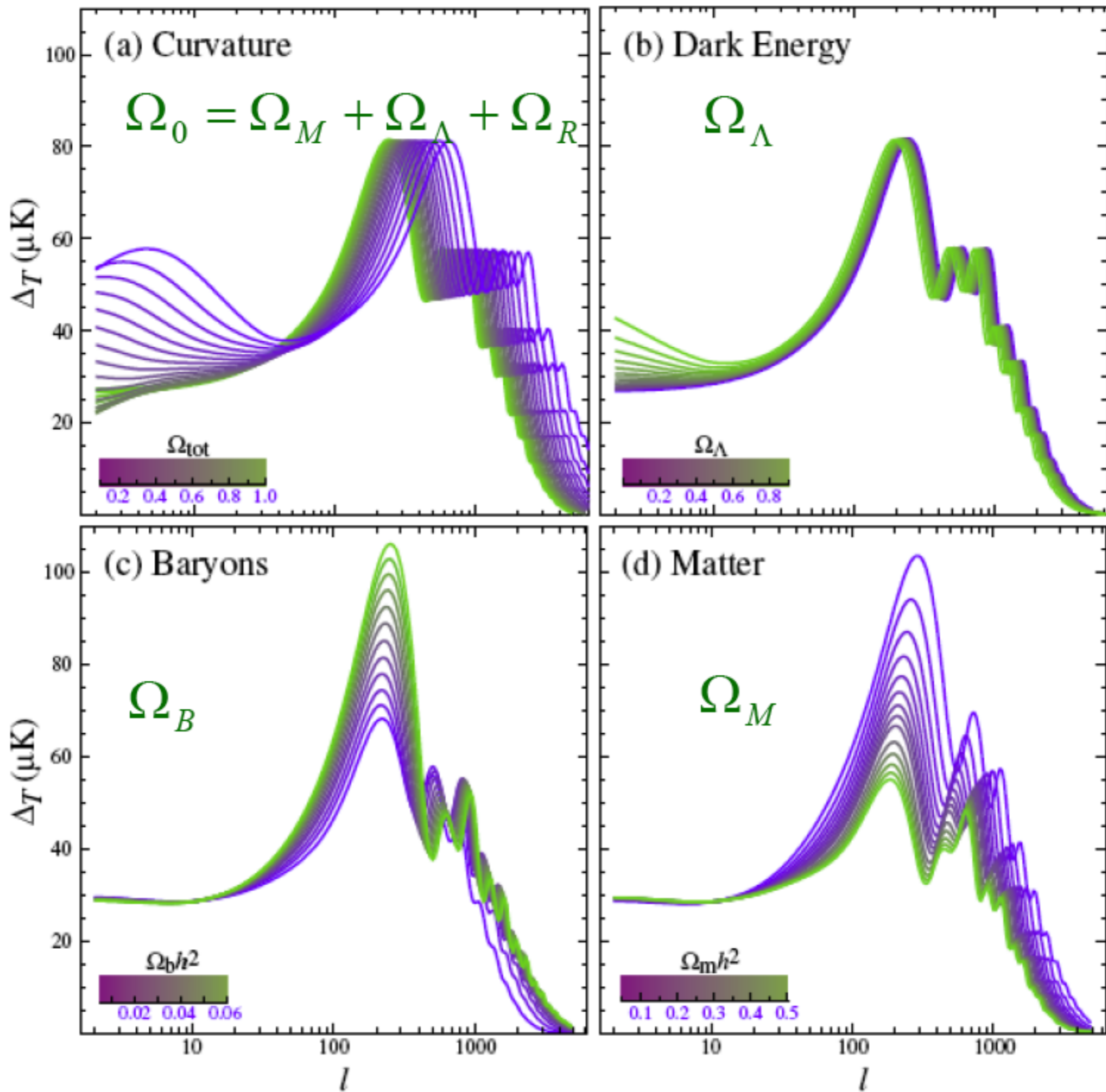
Les anisotropies du rayonnement fossile











Les anisotropies du rayonnement fossile

Le spectre de puissance angulaire dépend fortement des paramètres cosmologiques !

idée : faire varier les paramètres de façon à être le plus proche possible des données, cela donne :

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

Les anisotropies du rayonnement fossile

Le spectre de puissance angulaire dépend fortement des paramètres cosmologiques !

idée : faire varier les paramètres de façon à être le plus proche possible des données, cela donne :

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

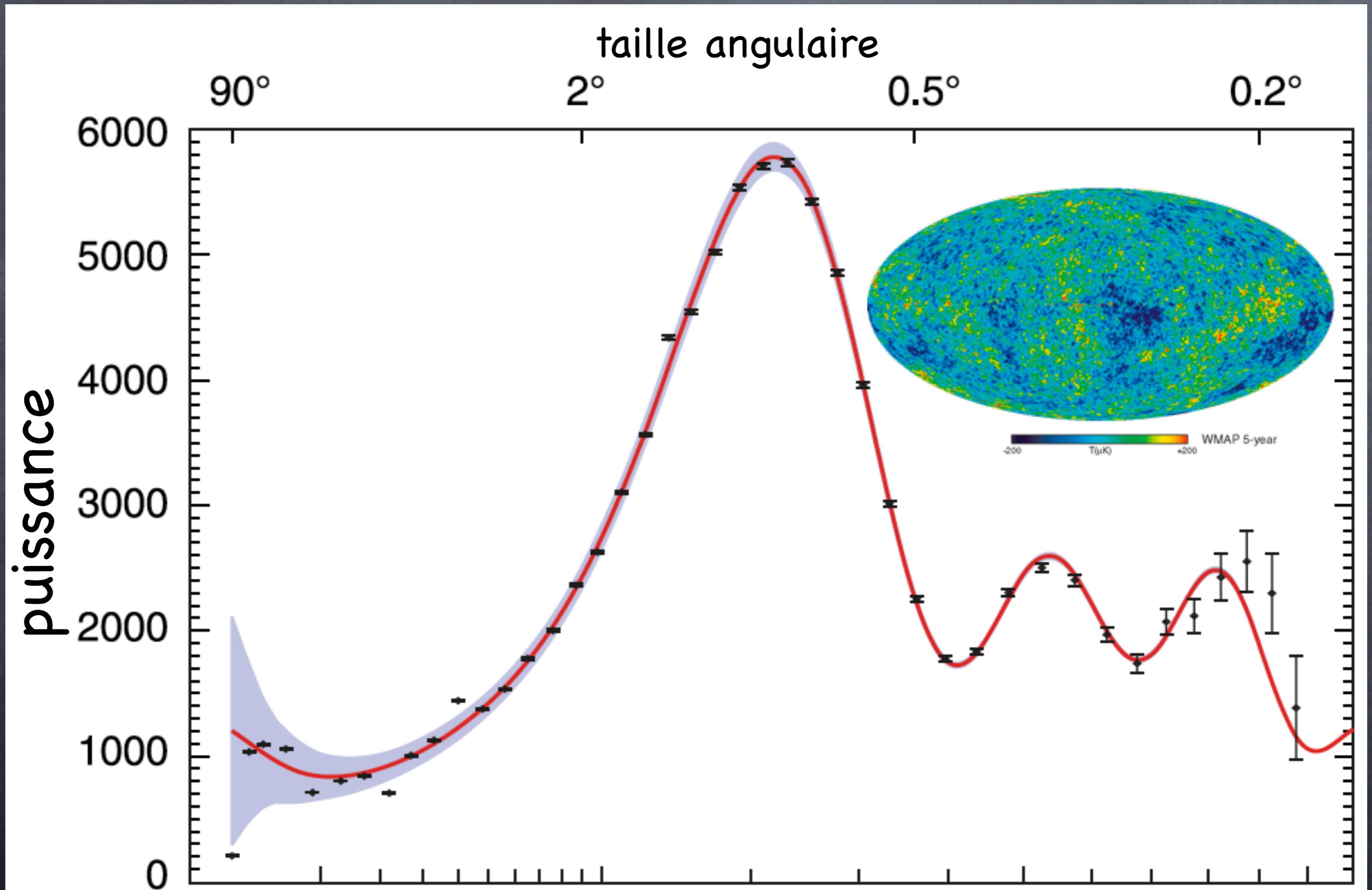
Les anisotropies du rayonnement fossile

Le spectre de puissance angulaire dépend fortement des paramètres cosmologiques !

idée : faire varier les paramètres de façon à être le plus proche possible des données, cela donne :

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

Les anisotropies du rayonnement fossile



Les anisotropies du rayonnement fossile

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

$$\Omega_{\text{matière}} = \Omega_c + \Omega_b \sim 0.25$$

Les anisotropies du rayonnement fossile

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

$$\Omega_{\text{matière}} = \Omega_c + \Omega_b \sim 0.25$$

matière usuelle (visible, étoiles, galaxies, planètes...)

Les anisotropies du rayonnement fossile

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

$$\Omega_{\text{matière}} = \Omega_c + \Omega_b \sim 0.25$$

matière noire !
86 % !!

matière usuelle (visible,
étoiles, galaxies, planètes...)

Les anisotropies du rayonnement fossile

t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.5 ± 1.3 km/s/Mpc
Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$
Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1131 ± 0.0034
Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015

$$\Omega_{\text{matière}} = \Omega_c + \Omega_b \sim 0.25$$

Ω_Λ énergie noire ! (74 %)

Les limites du Big Bang

Ω_Λ énergie noire ! (74 %)
expansion **accélérée** !

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad p < -\rho/3$$

nature de la matière noire

platitude de l'Univers : **coïncidence extraordinaire** !

le rayonnement fossile est uniforme sur toute
la sphère céleste : **incompréhensible** !

Les limites du Big Bang

la platitude

$\Omega_m + \Omega_\Lambda > 1$	fermé	Big-Crunch ou expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda < 1$	ouvert (exponentiel)	expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$	ouvert, plat ! (limite nulle)	expansion éternelle

Les limites du Big Bang

la platitude

$\Omega_m + \Omega_\Lambda > 1$	fermé	Big-Crunch ou expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda < 1$	ouvert (exponentiel)	expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$	ouvert (nulle)	expansion éternelle

très instable !

Les limites du Big Bang

la platitude

$\Omega_m + \Omega_\Lambda > 1$	fermé	Big-Crunch ou expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda < 1$	ouvert (exponentiel)	expansion éternelle
$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$	ouvert (nulle)	expansion éternelle

très instable !

mais c'est ce que nous observons !

Les limites du Big Bang

la platitude

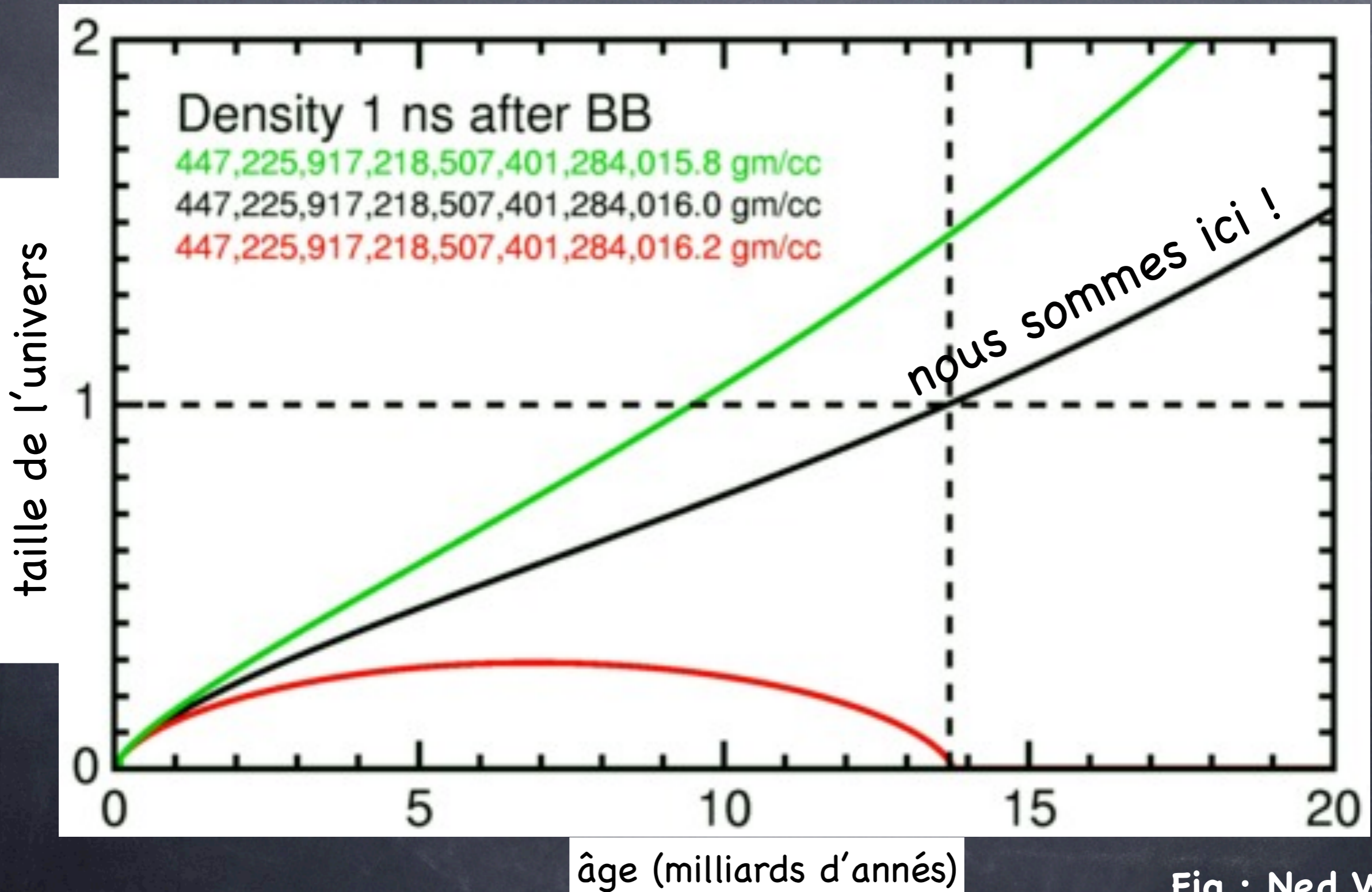
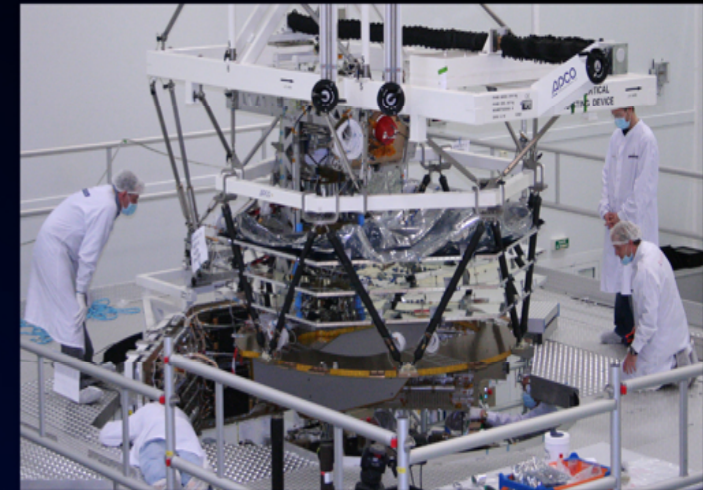
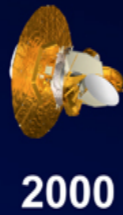


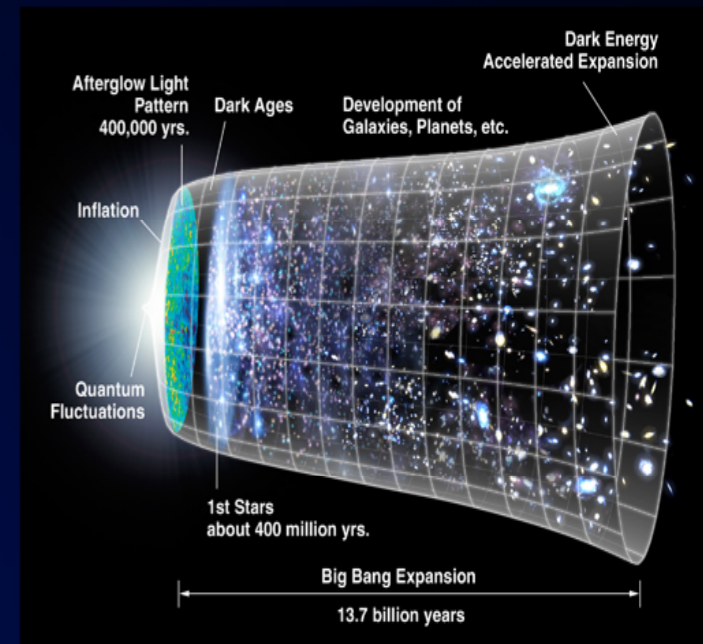
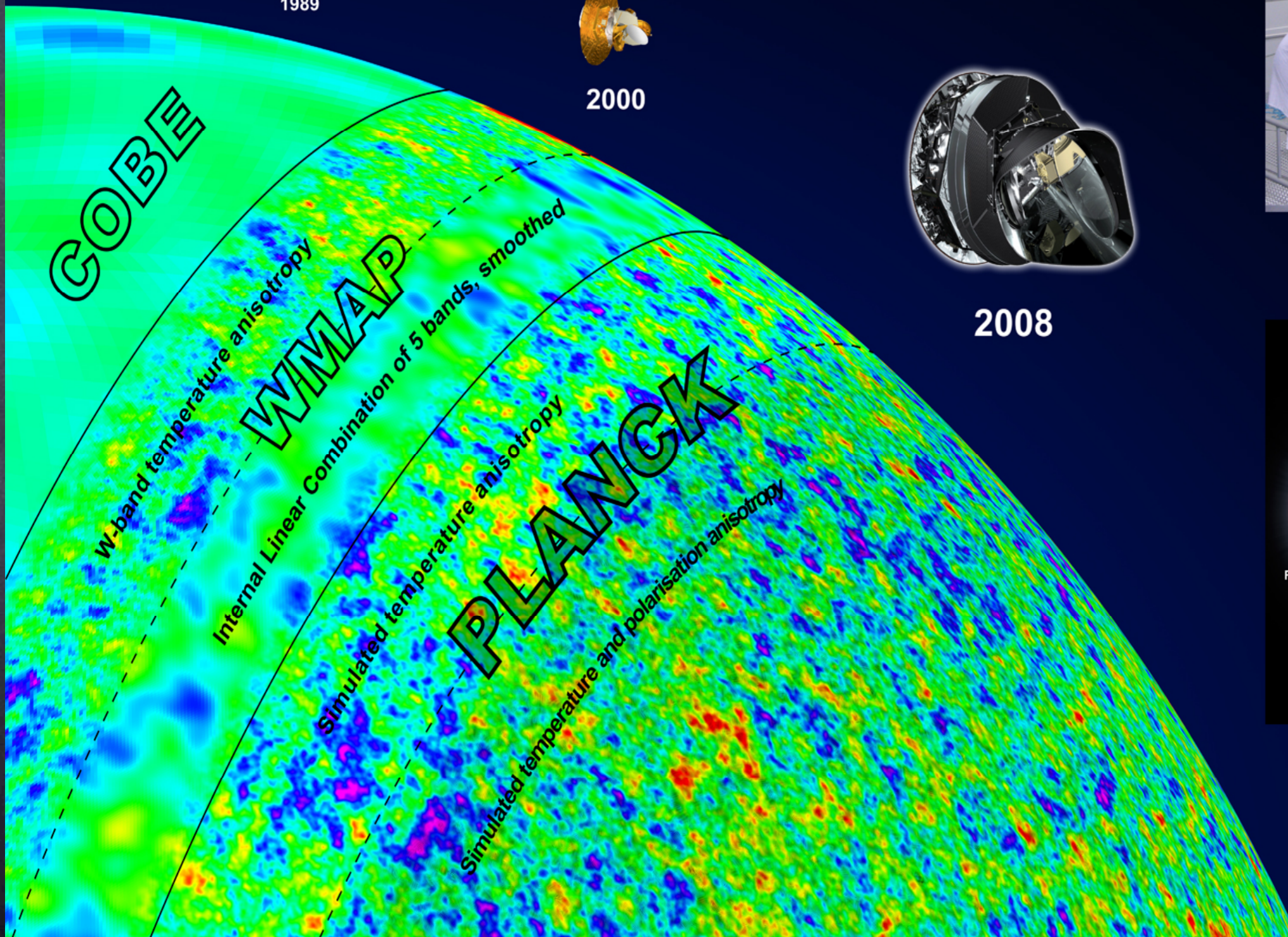
Fig : Ned Wright

CMB Missions Revolutionise Our Understanding of the Universe

PLANCK



Planck spacecraft in clean assembly at Alcatel Alenia Space in January 2007



Planck

Télescope : miroir primaire
de 1,5 m de diamètre

Plan Focal
contenant les instruments
scientifiques refroidis

Plate-forme :

- Avionique (Contrôle d'attitude,
gestion des données)
- Puissance électrique
- Télécommunications
et instruments électroniques

Panneau solaire
et module de service



4,2 m



4,2 m



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

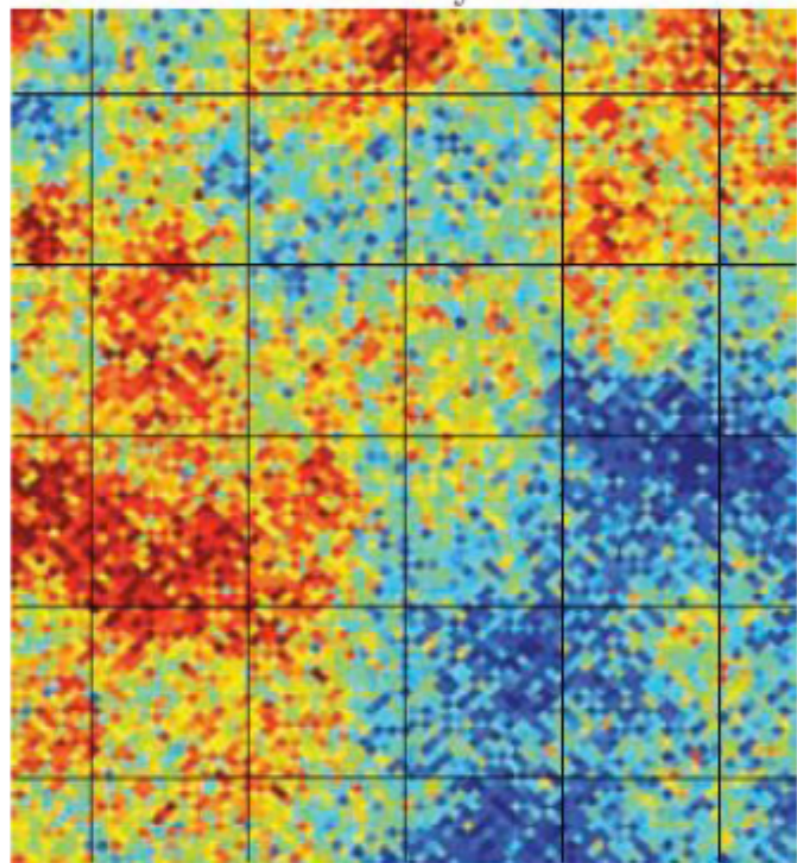
Planck HFI, c'est aussi :

- 50 000 composants
électroniques,
- 36 000 litres d'Hélium 4,
- 12 000 litres d'Hélium 3,
- 11 400 documents.

Planck - performances

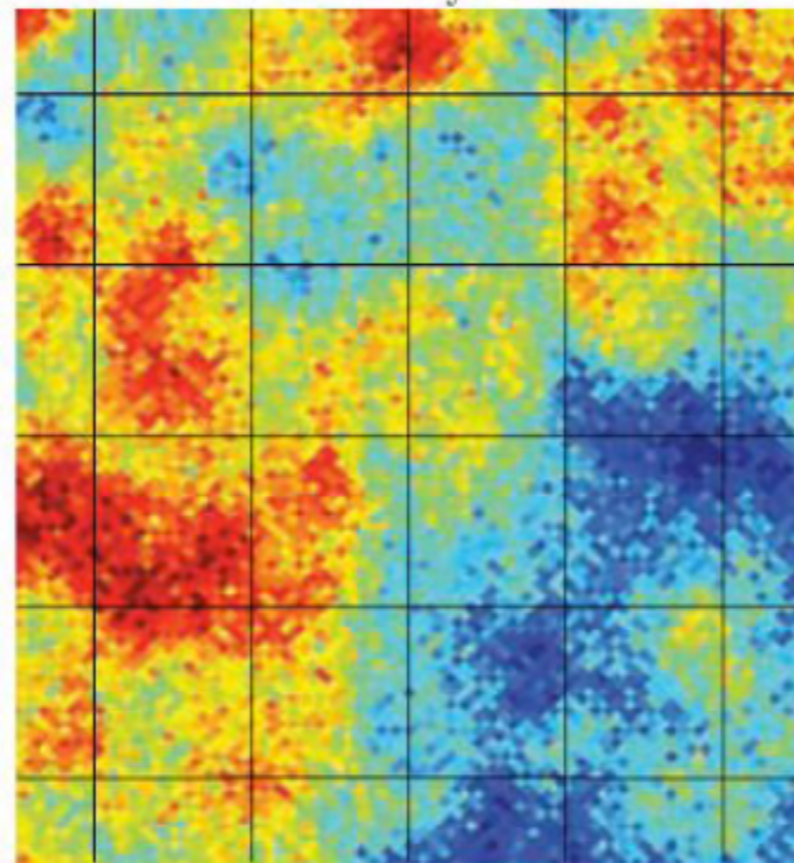
10 fois plus sensible que WMAP, une
résolution angulaire 3 fois meilleure
et sensible à la polarisation

WMAP 2 years



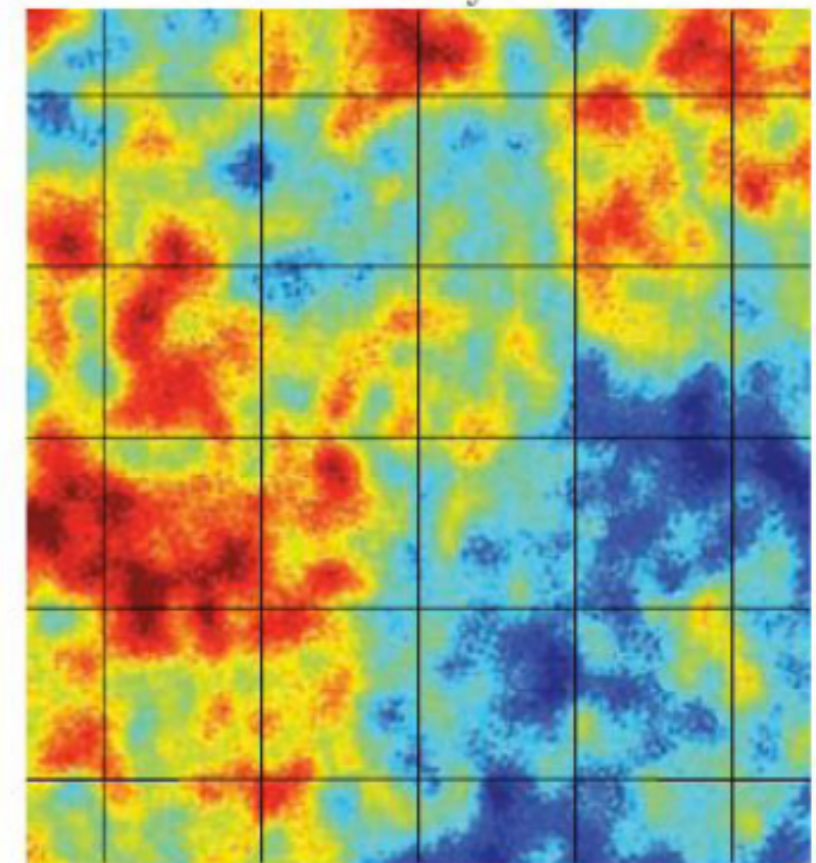
-300 300 μK

WMAP 8 years



-300 300 μK

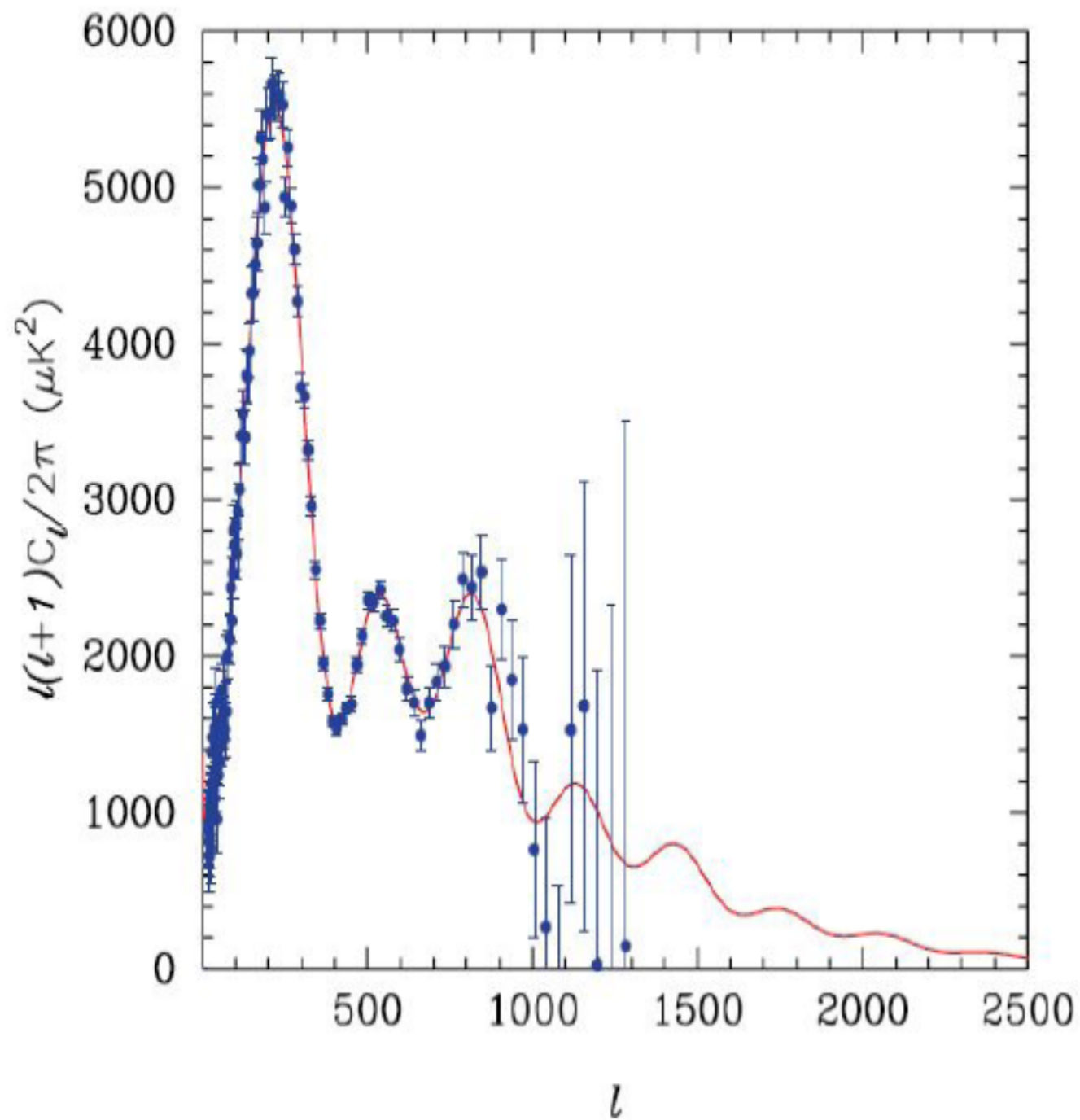
Planck 1 year



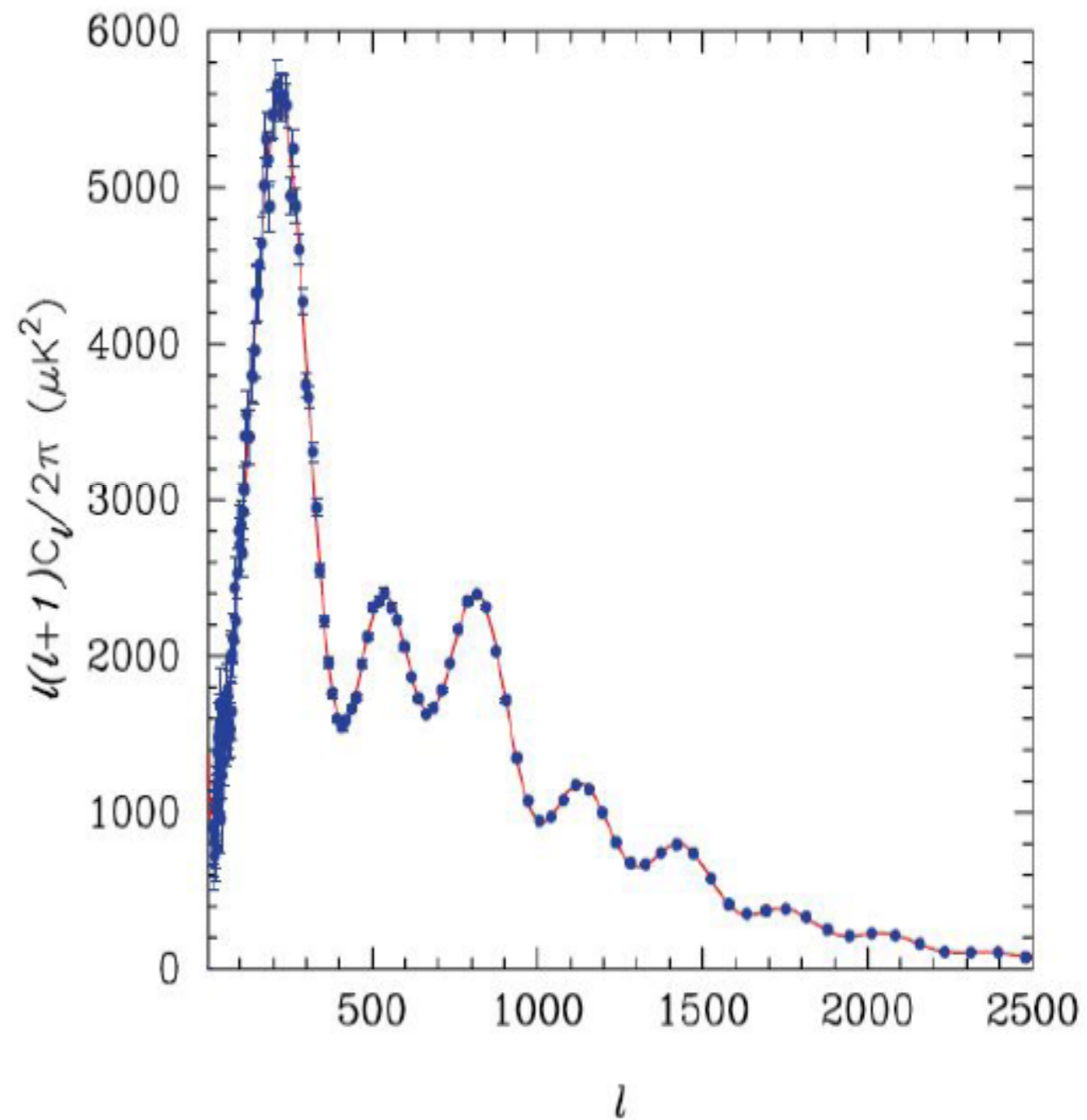
-300 300 μK

Planck

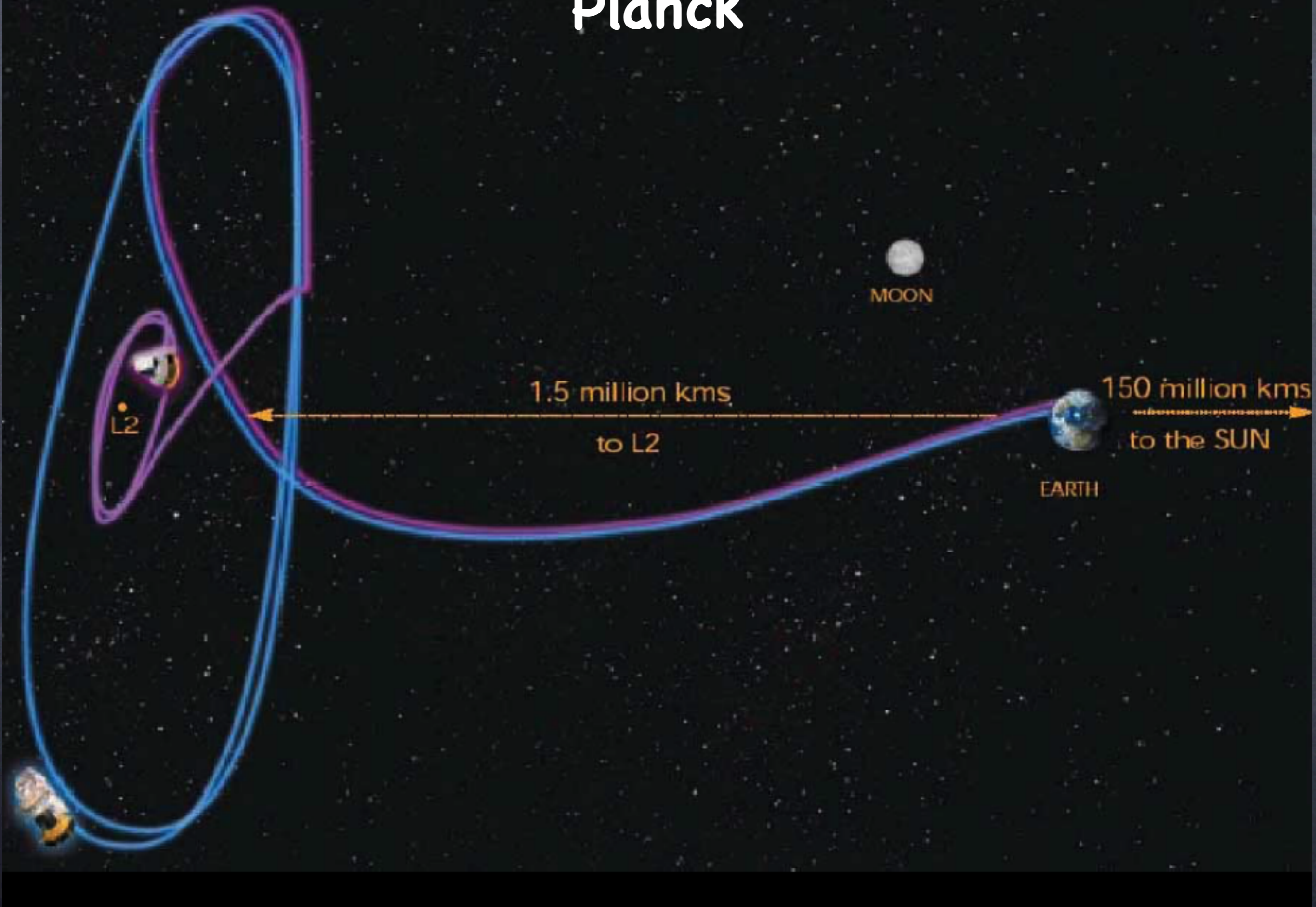
WMAP



PLANCK



Planck



<http://public.planck.fr/>

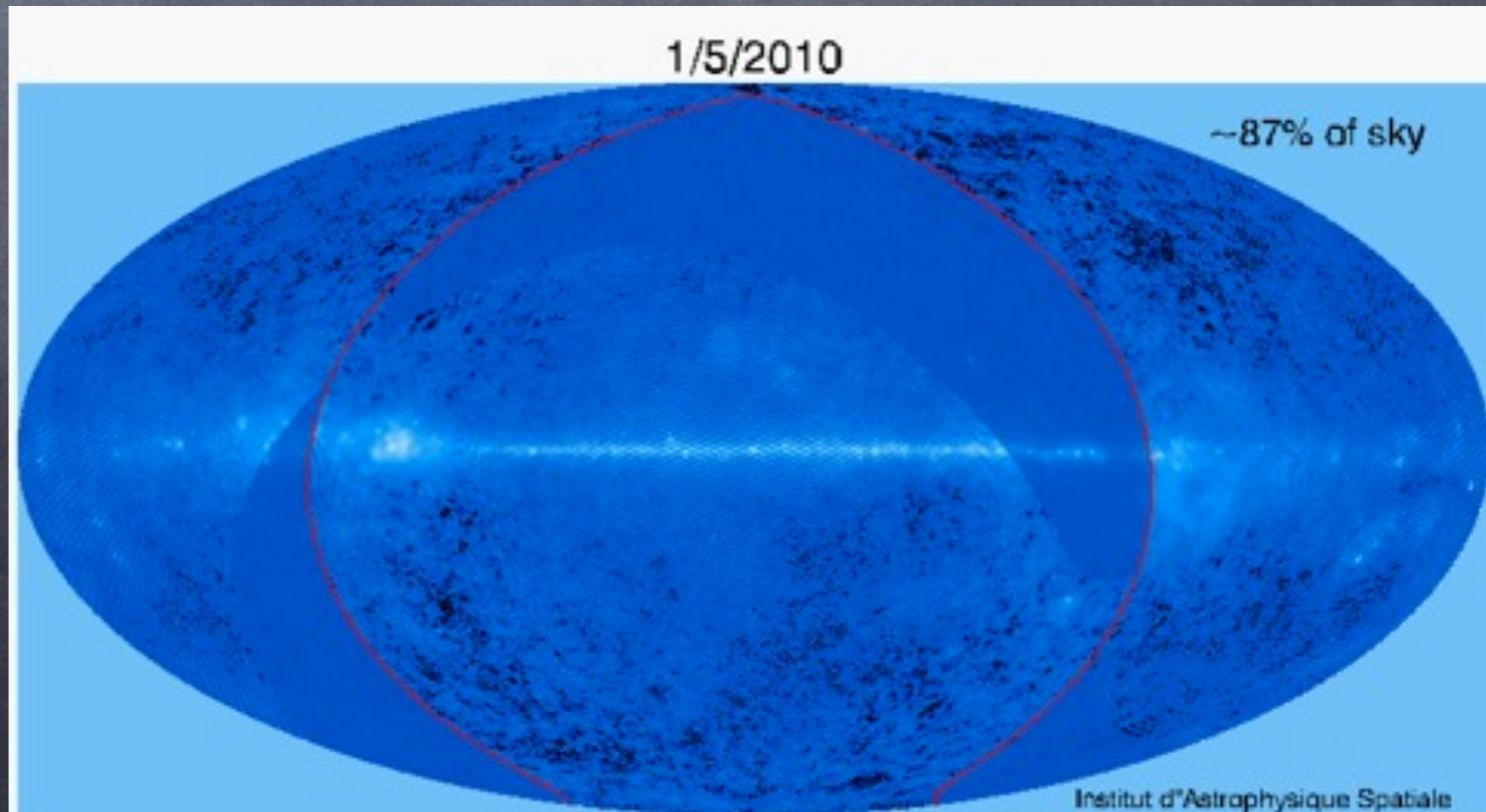


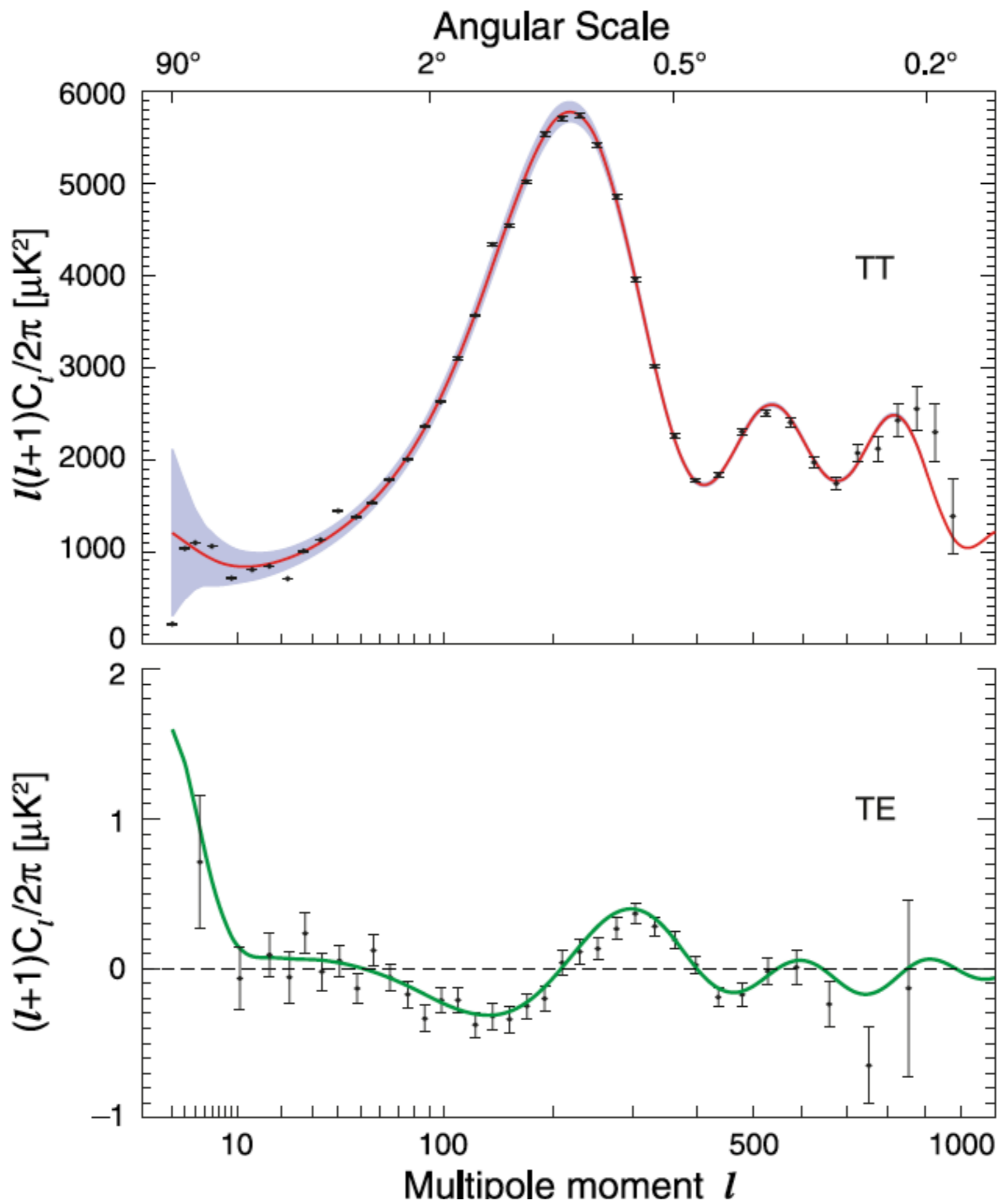
Planck

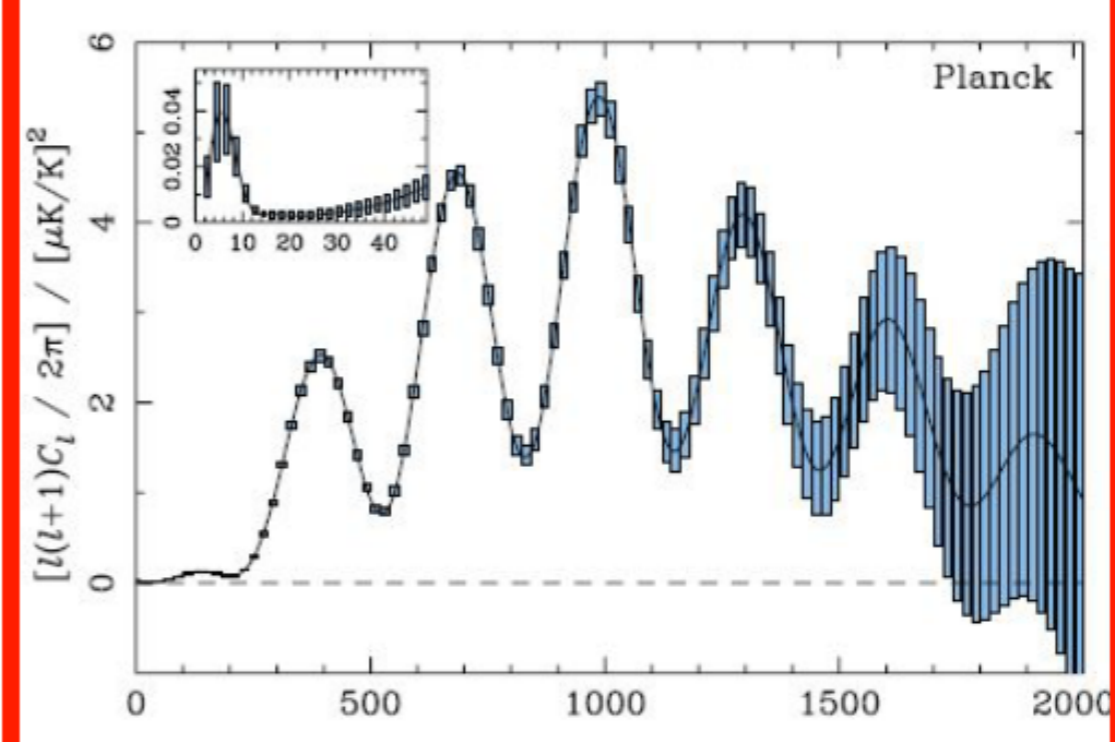
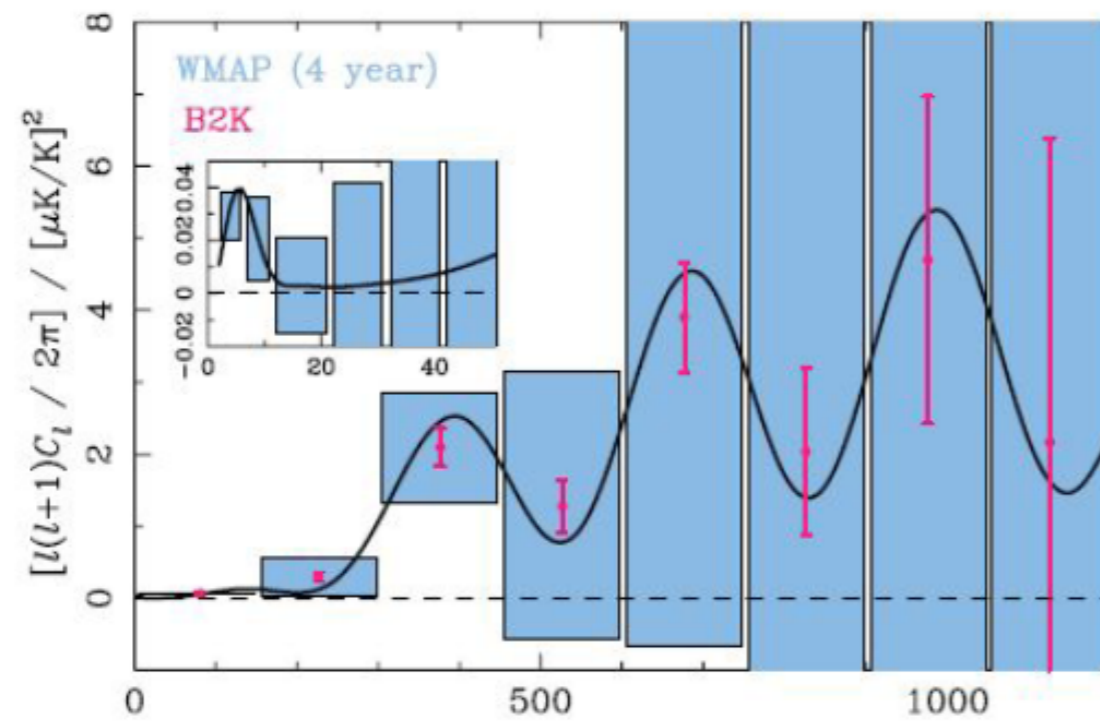
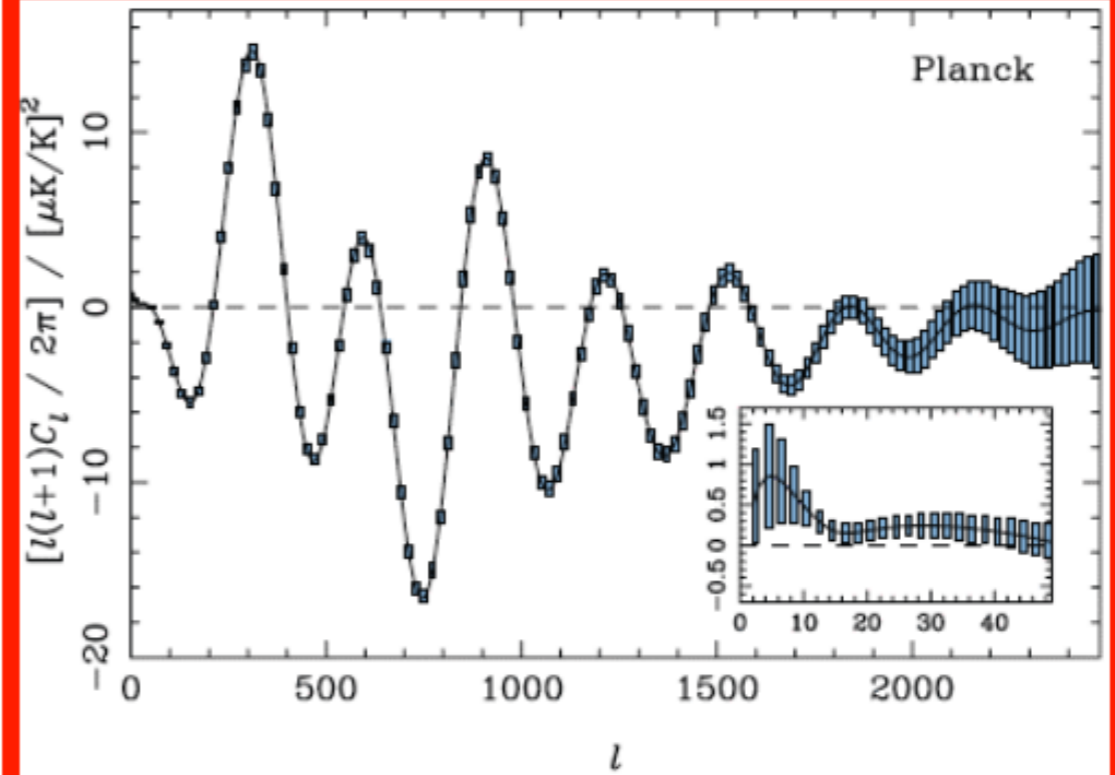
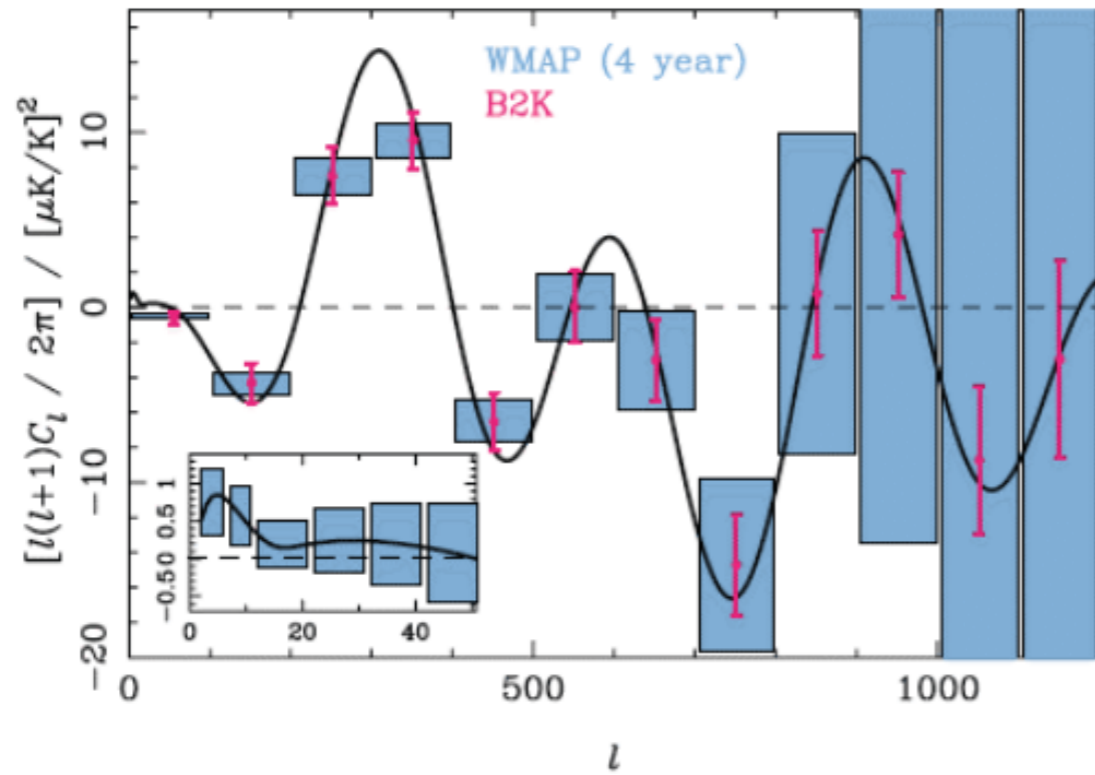
Lancé le 14 mai 2009

Herschel

Planck







E-modes, as will be observed by Planck