

**A cache-cache  
avec la matière et l'énergie  
de l'Univers**

**Festival des deux infinis. 3 octobre 2013. Marc Moniez. CNRS**

- **Introduction: la cosmologie**
  - une science récente
  - les 3 piliers
    - la fuite des galaxies
    - le rayonnement de fond cosmologique
    - la nucléosynthèse primordiale
- **La matière cachée**
  - Pourquoi cette hypothèse?
  - Sous quelle forme(s)
- **pourquoi l'énergie noire?**
- **Et après...**

# La cosmologie

## De quoi s'agit-il ?

- L'histoire de l'univers  
- passé et futur -
- Le contenu de l'univers
- Sa structuration

# La cosmologie avant le XXème siècle



# La cosmologie avant le XXème siècle

- **Discipline purement spéculative et dogmatique car**
  - Peu de données donc peu de contraintes
- **Jusqu'en 1543 (Copernic, 1473-1543) la Terre est au centre de l'univers**
- **Avec Galilée (1564-1642), le ciel n'est plus immuable (taches solaires)**
- **Jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle, le soleil est au centre de l'univers**
- **L'Univers s'arrête aux limites de la Voie Lactée. Il est jeune et la Terre n'a que quelques centaines de millions d'années**
  - Kelvin, 1862, calcul basé sur le temps de refroidissement

# Le tournant du XXème siècle

DANS LE LABORATOIRE DE  
PHYSIQUE APPLIQUÉE DU MUSÉUM,  
HENRI BECQUEREL A DÉCOUVERT  
LA RADIOACTIVITÉ LE 1er MARS 1896

- **Découverte de la radioactivité**  
(Becquerel 1896): La Terre vieillit...  
Car elle se refroidit bien plus lentement que  
calculé sans l'énergie nucléaire.  
Et tout l'Univers avec
- **Relativité, mécanique quantique...**
- **Construction des premiers grands  
télescopes**



# Le début de la cosmologie moderne:

## Les trois piliers de la cosmologie

### 1- La fuite des galaxies

- **W. Hershell** (1738-1822) soupçonne que certaines nébuleuses sont des « univers-îles » semblables à la voie lactée.
- En 1929 **E. Hubble** observe que les galaxies s'écartent les unes des autres
  - Comment a-t'il fait? Effet Doppler
  - Comment l'interpréter? Par l'expansion

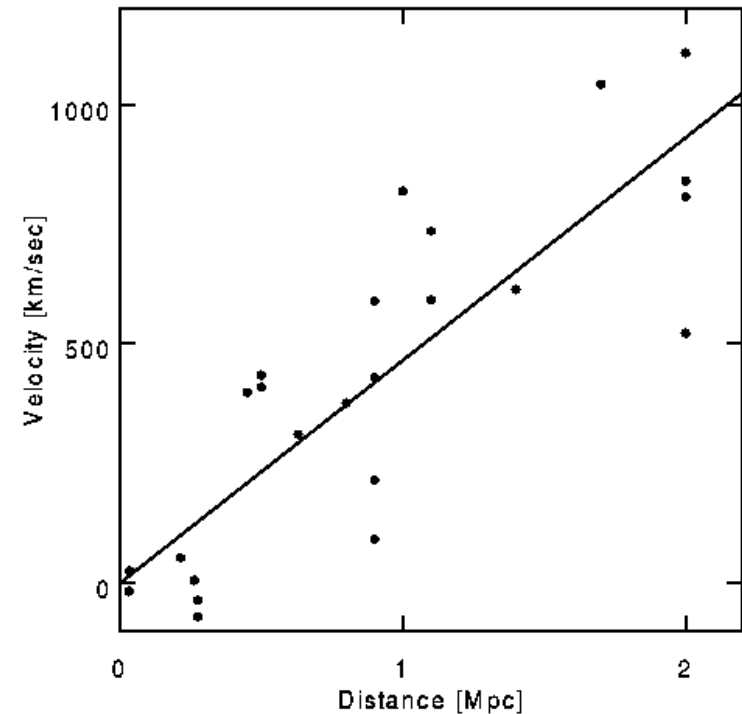
**Interprétons  
quelques  
observations**

# Le début de la cosmologie moderne:

## Les trois piliers de la cosmologie

### 1- La fuite des galaxies

- **W. Hershell** (1738-1822) soupçonne que certaines nébuleuses sont des « univers-îles » semblables à la voie lactée.
- En 1929 **E. Hubble** observe que les galaxies s'écartent les unes des autres
  - Comment a-t'il fait? Effet Doppler
  - Comment l'interpréter? Par l'expansion



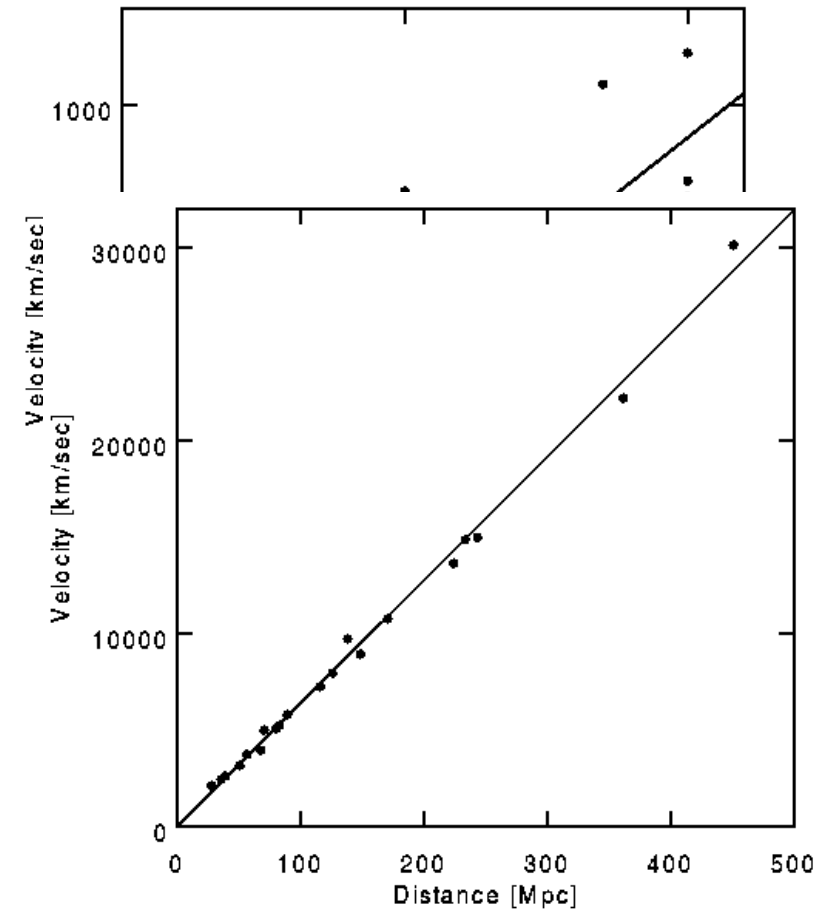


# Le début de la cosmologie moderne:

## Les trois piliers de la cosmologie

### 1- La fuite des galaxies

- **W. Hershell** (1738-1822) soupçonne que certaines nébuleuses sont des « univers-îles » semblables à la voie lactée.
- En 1929 **E. Hubble** observe que les galaxies s'écartent les unes des autres
  - Comment a-t'il fait? Effet Doppler
  - Comment l'interpréter? Par l'expansion

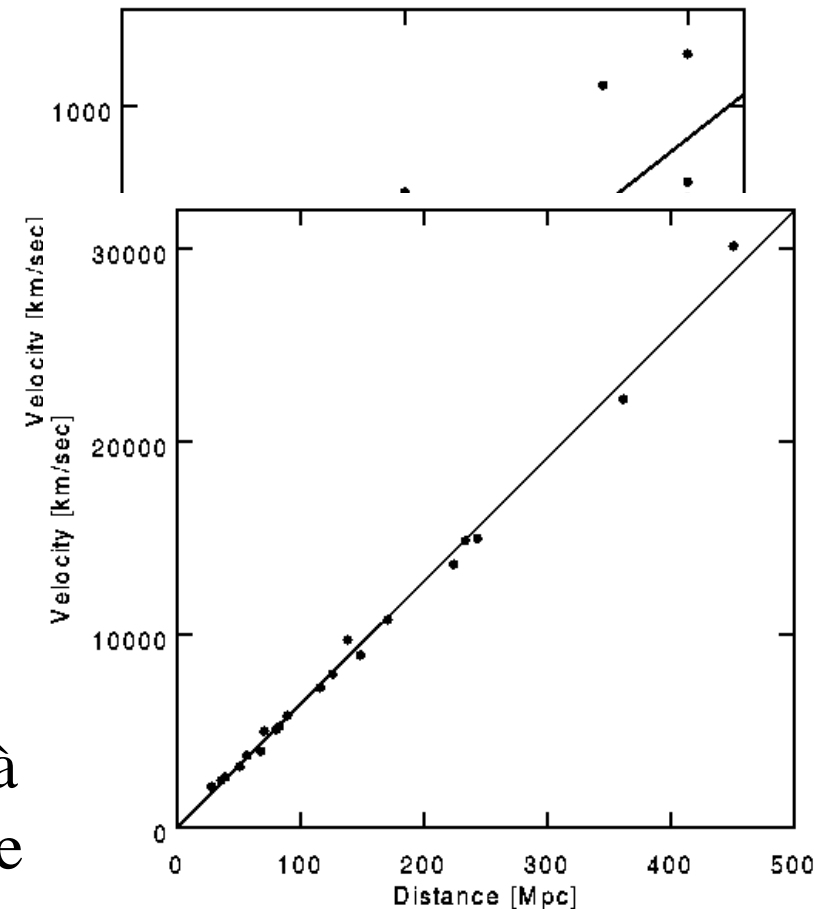


# Le début de la cosmologie moderne:

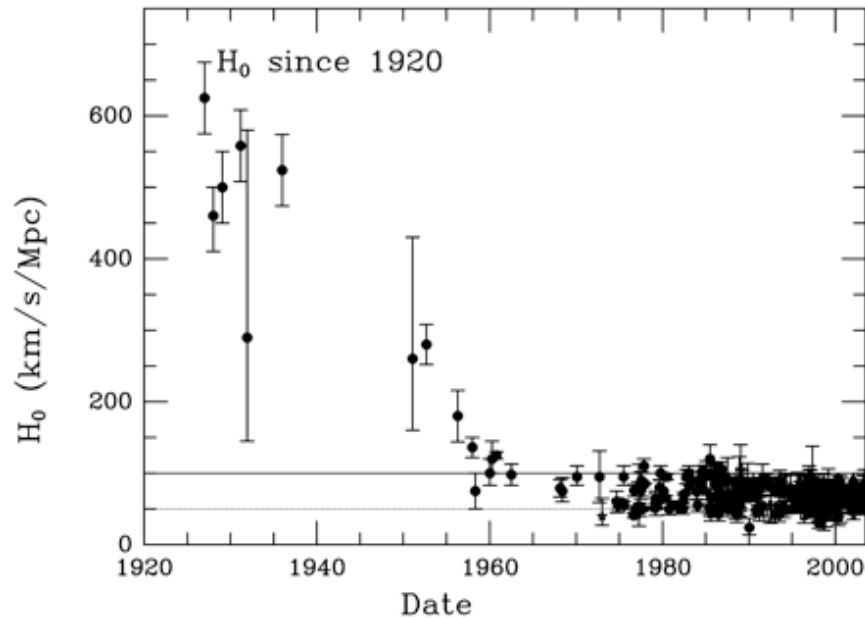
## Les trois piliers de la cosmologie

### 1- La fuite des galaxies

- **W. Hershell** (1738-1822) soupçonne que certaines nébuleuses sont des « univers-îles » semblables à la voie lactée.
- En 1929 **E. Hubble** observe que les galaxies s'écartent les unes des autres
  - Comment a-t'il fait? Effet Doppler
  - Comment l'interpréter? Par l'expansion
- On peut alors imaginer le passé grâce à la réversibilité des lois de la mécanique
  - On conclut inévitablement au Big-Bang



# La loi de Hubble



Vitesse de fuite Distance

$$V = H_0 \times D$$

$67.8 \pm 0.8$  km/s par Mpc\*

$$V = 21 \text{ km/s} \times \text{Distance} / (1.000.000 \text{ d'années lumière})$$

ou

$$V = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ km/s} \times (\text{Distance} / 1 \text{ km})$$

$$V = 7 \text{ microns/siècle} \times (\text{Distance} / 1 \text{ km})$$

\*1 Megaparsec (Mpc) =  $3,08 \cdot 10^{19}$  km = 3,26 millions d'années lumière

# Conséquences de la loi de Hubble

- L'univers que nous connaissons a un **âge fini** dont on peut facilement avoir une idée.

*En supposant que le taux d'expansion est resté constant:*

Prenons une galaxie située aujourd'hui à la distance **D** de la Terre.

Quelle durée **t<sub>0</sub>** lui a-t-il fallu pour parcourir cette distance **D** à la vitesse **V** ?

$$t_0 = D/V \text{ comme } V = H_0 \cdot D \Rightarrow t_0 = 1/H_0$$

A.N :  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} \Rightarrow t_0 = 4,3 \cdot 10^{17} \text{ s} = \mathbf{14 \text{ milliards d'années}}$

- L'univers est passé par un stade très dense et très chaud
- Peut-on prévoir quelque chose de plus?

# Le début de la cosmologie moderne:

## Les trois piliers de la cosmologie

### 2- Le rayonnement cosmologique

- Ingénieurs de Bells lab. Ils mettent au point une antenne micro-onde pour recevoir les signaux du premier satellite de communications.
- Un bruit parasite les gêne, qui semble venir de toutes les directions.
- Ils vérifient tout l'appareillage, ils essaient de chasser les pigeons dont les déjections pourraient avoir un effet parasite -> en vain... Le parasite est toujours là.
- C'est la découverte du rayonnement thermique fossile à 2,7 K (-270°C)
- L'Univers était à 3000 degrés lorsque ce rayonnement s'en est échappé.

### Penzias et Wilson 1964



# Gamow, Alpher et Herman l'avaient prédit dès 1948!

- On commence à prendre au sérieux l'hypothèse d'un Big-Bang, avancée dès 1927 par l'abbé **G. Lemaître**
- Un grand chantier se met en route qui continue de nos jours

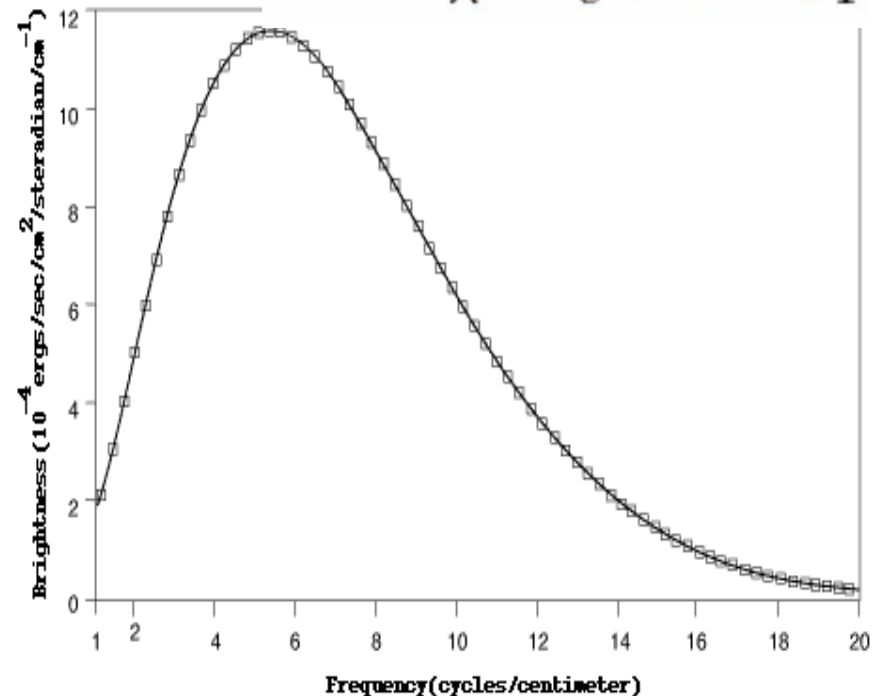


# Le rayonnement de fond cosmologique

- Ce rayonnement, c'est celui d'un corps noir à 3000 degrés (ampoule à incandescence)
- Il a lui-même suivi l'expansion de l'espace
- Et équivaut aujourd'hui à celui d'un corps plus très chaud (2,7 K, soit -270°C)
- Au moment où il s'est échappé, il était visible. Il a glissé à l'infra-rouge puis au micro-onde.

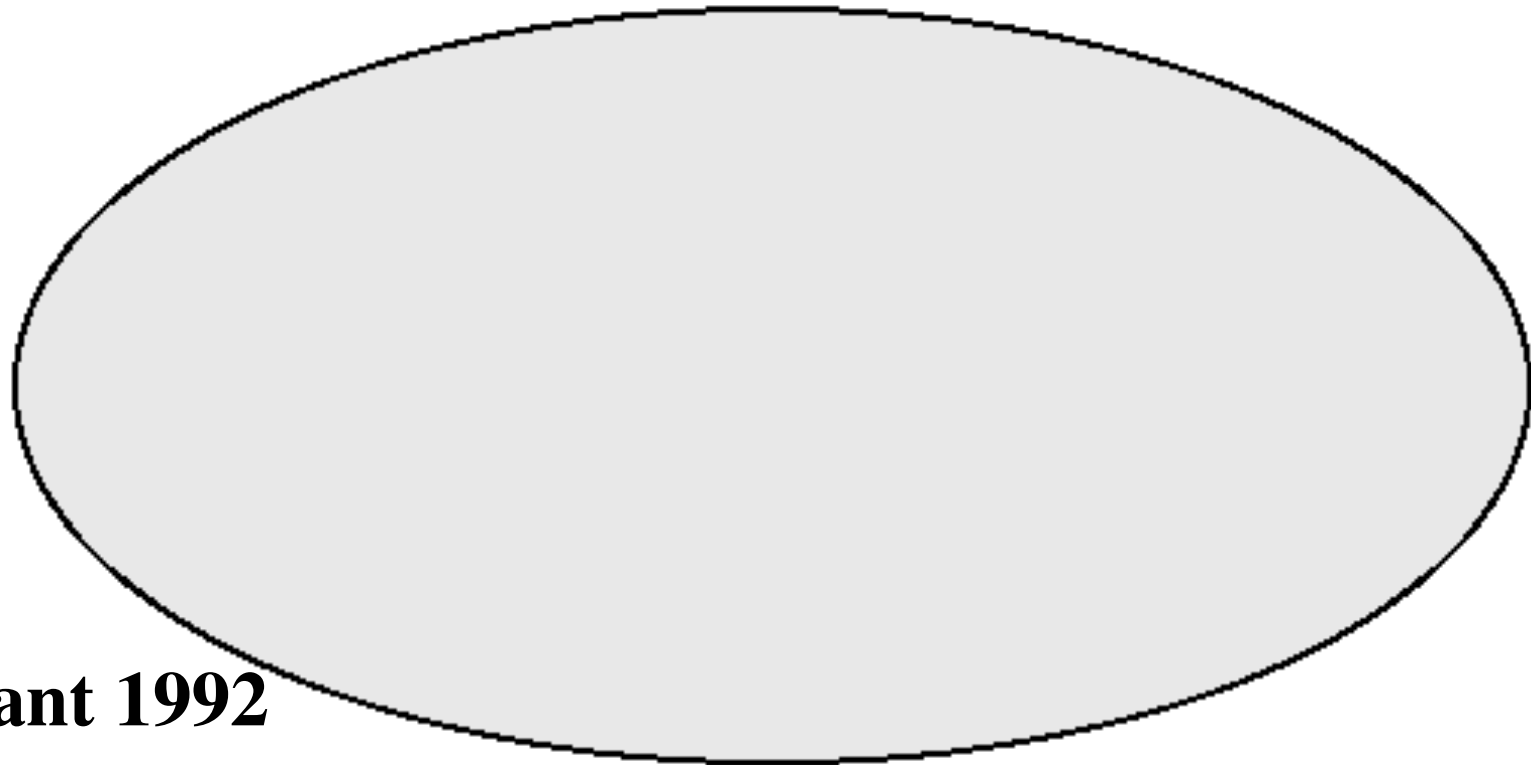
Un spectre de corps noir dont toutes les longueurs d'onde subissent le même décalage vers le rouge reste un spectre de corps noir, mais à une température différente

$$L_{\lambda}^o = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$



# On en fait actuellement la carte de plus en plus précise

- Avec des missions spatiales ou des ballons-sonde
- Avec une résolution qui s'améliore rapidement

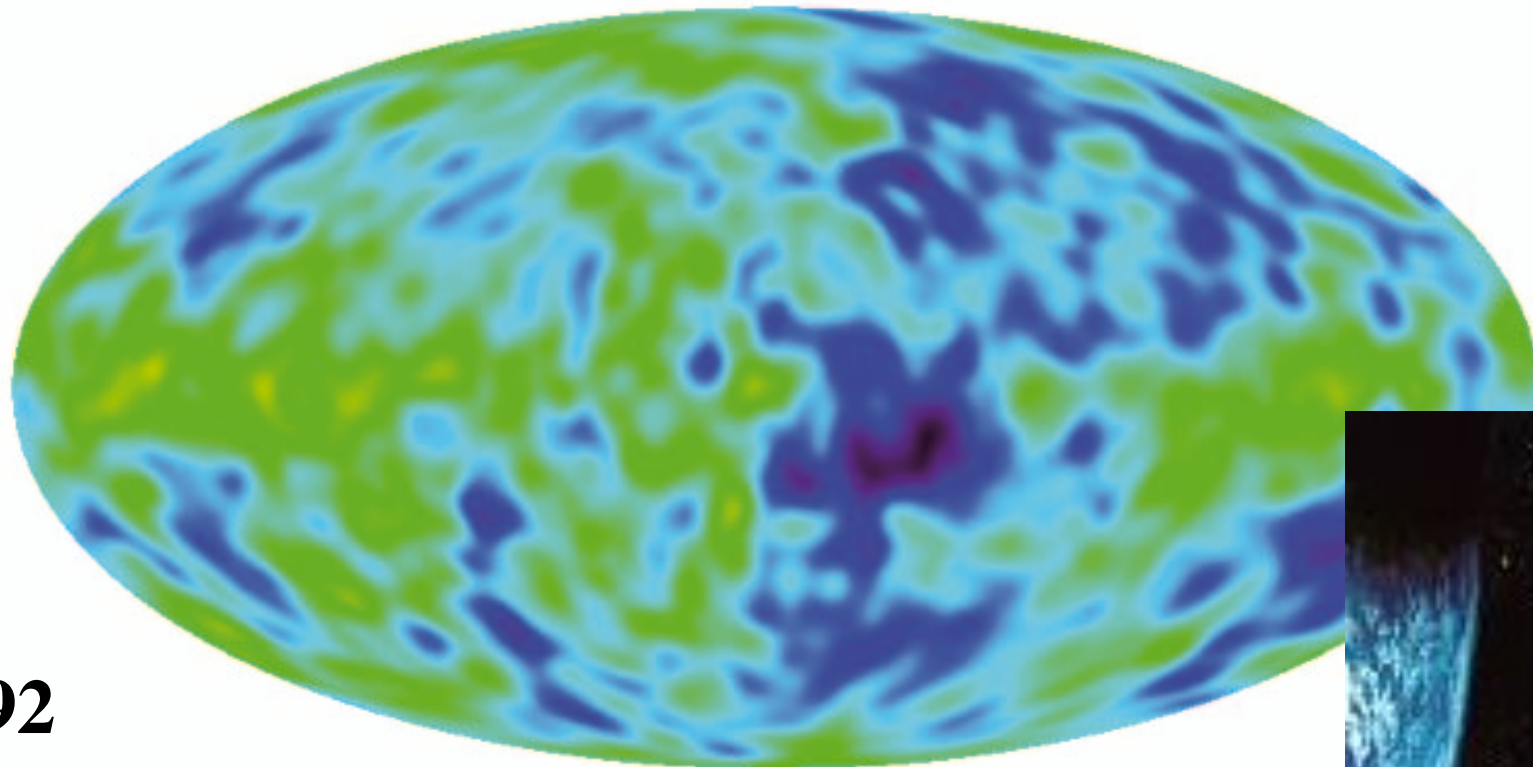


**Avant 1992**



# On en fait actuellement la carte de plus en plus précise

- Avec des missions spatiales ou des ballons-sonde
- Avec une résolution qui s'améliore rapidement



1992

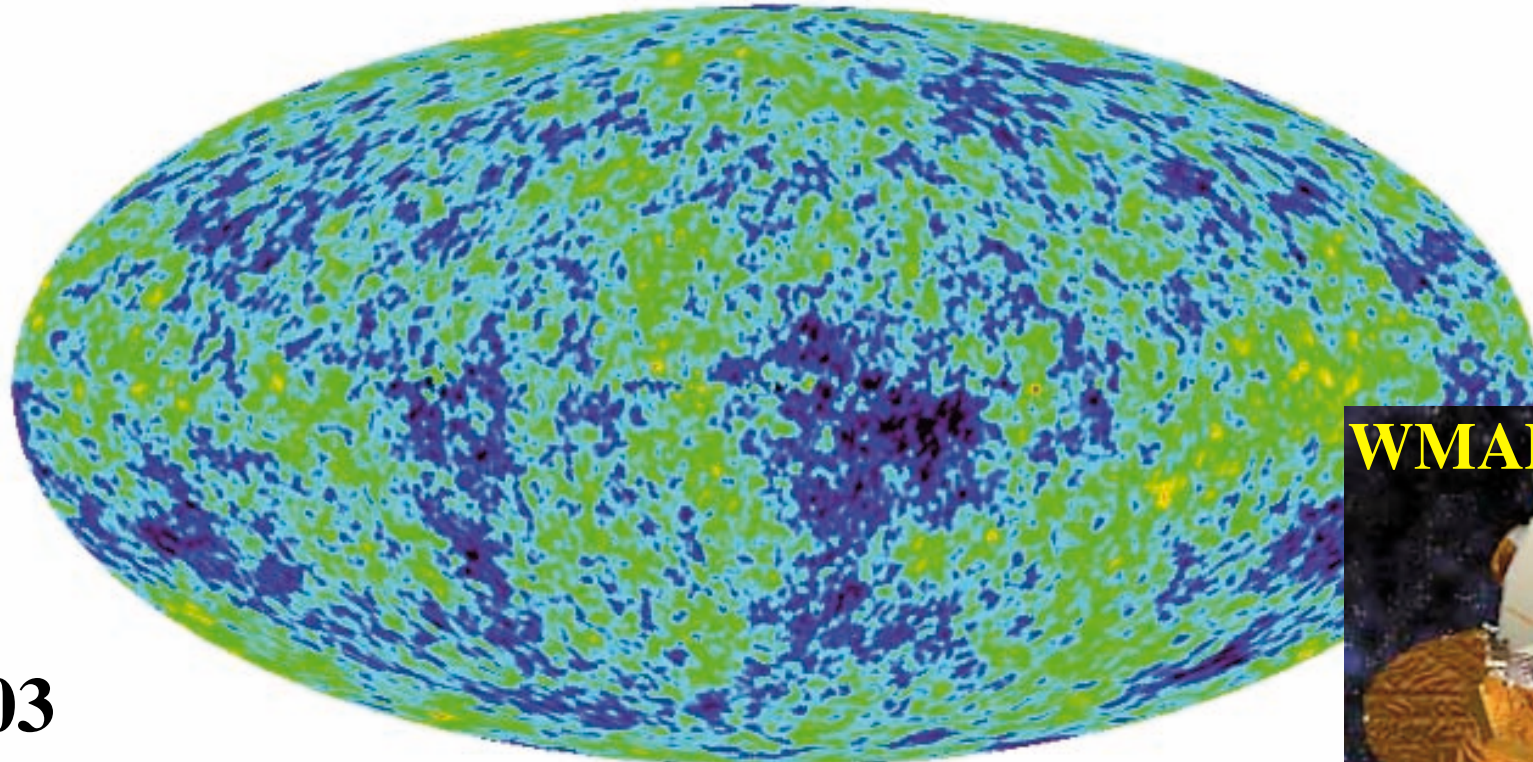
Écarts de température max.  $\sim 0.2$  mK



**COBE**

# On en fait actuellement la carte de plus en plus précise

- Avec des missions spatiales ou des ballons-sonde
- Avec une résolution qui s'améliore rapidement



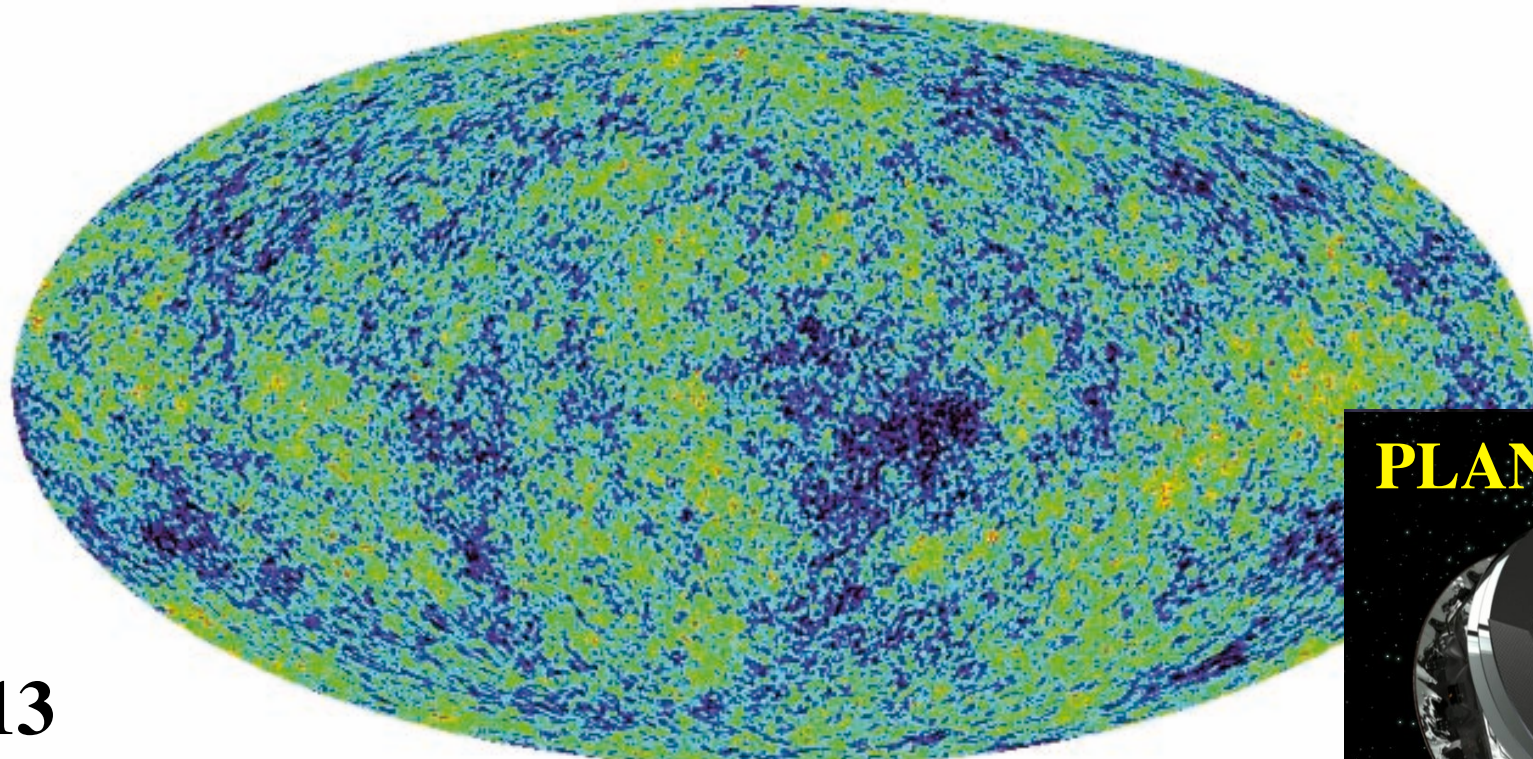
**2003**

**Ecart de température max.  $\sim 0.2$  mK**



# On en fait actuellement la carte de plus en plus précise

- Avec des missions spatiales ou des ballons-sonde
- Avec une résolution qui s'améliore rapidement



2013

**Ecart de température max.  $\sim 0.2$  mK**



# Le début de la cosmologie moderne:

## Les trois piliers de la cosmologie

### 3- La nucléosynthèse primordiale

**Nucléosynthèse** = processus de formation des noyaux autres que H. On distingue:

- La **nucléosynthèse primordiale**, qui se produit dans les premières minutes suivant le Big-Bang. Elle produit seulement H, He, Li, Be
- La **nucléosynthèse stellaire**, qui se produit dans le « fourneau » des étoiles
- La **nucléosynthèse « explosive »**

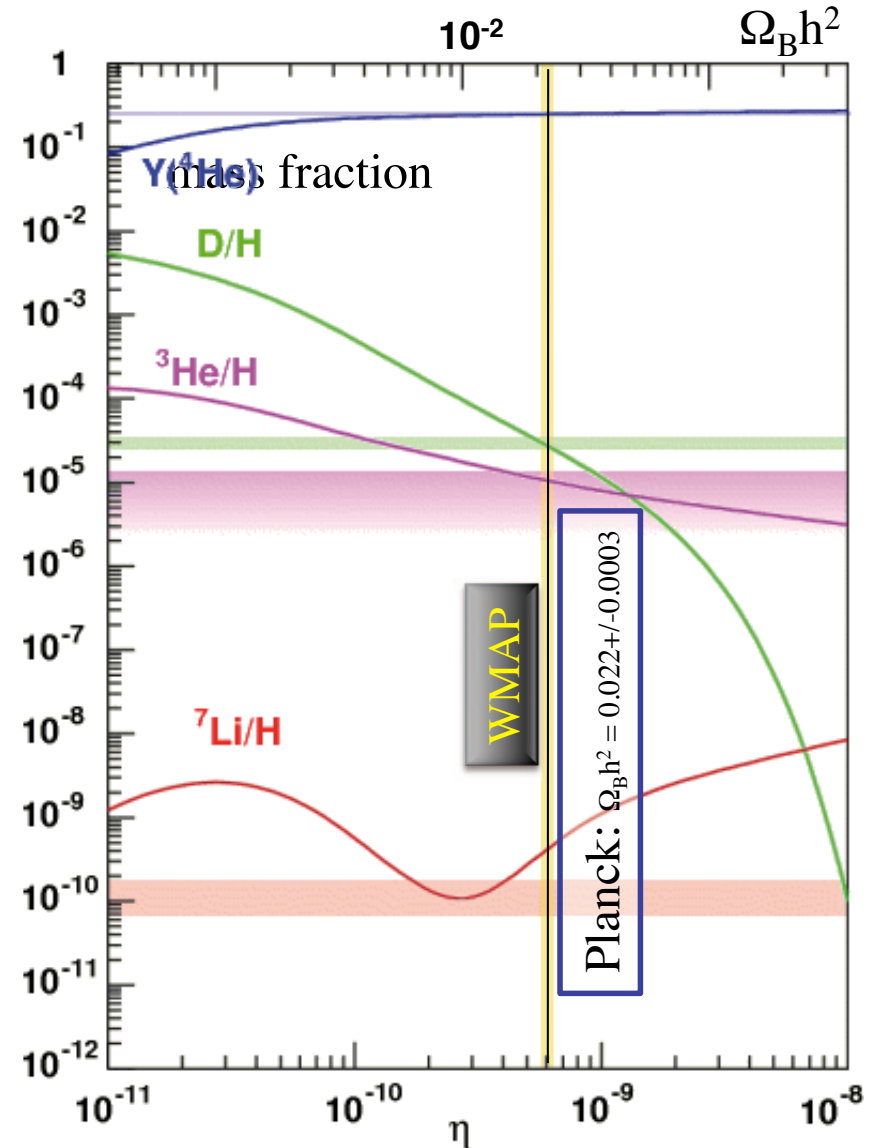
Tableau périodique coloré indiquant l'origine de la nucléosynthèse des éléments :

- Big Bang (orange)
- Supernovae (bleu)
- Large Stars (jaune)
- Small Stars (rouge)
- Cosmic Rays (vert)

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F			Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl			Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I			Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At			Rn
Fr	Ra																		
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			Lr

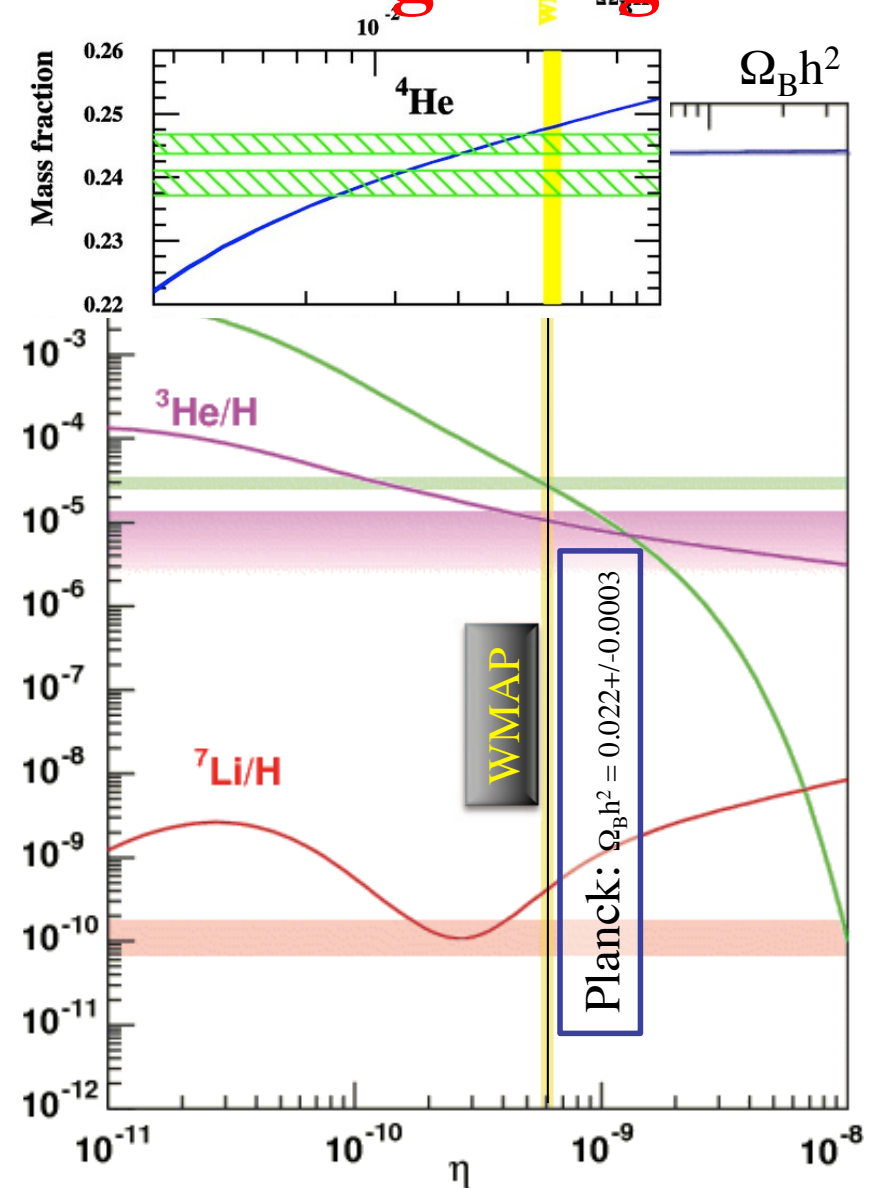
# Les abondances des éléments légers sont calculables avec le modèle du Big-Bang

- **H, He, Li** sont primordiaux car produits lors du Big-Bang :  
**nucléosynthèse primordiale**
- Après la formation de ces éléments légers, l'univers était trop grand pour que les autres éléments se forment. Ils ont donc été et sont toujours synthétisés dans les étoiles et les supernovae :  
**nucléosynthèse stellaire**
- La valeur de la densité d'atomes ( $\Omega_B$ ) déduite indique qu'il y a environ **8 fois plus** d'atomes que ce qui est visible autour de nous



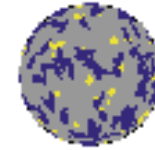
# Les abondances des éléments légers sont calculables avec le modèle du Big-Bang

- **H, He, Li** sont primordiaux car produits lors du Big-Bang : **nucléosynthèse primordiale**
- Après la formation de ces éléments légers, l'univers était trop grand pour que les autres éléments se forment. Ils ont donc été et sont toujours synthétisés dans les étoiles et les supernovae : **nucléosynthèse stellaire**
- La valeur de la densité d'atomes ( $\Omega_B$ ) déduite indique qu'il y a environ **8 fois plus** d'atomes que ce qui est visible autour de nous



# Le cadre de la cosmologie moderne

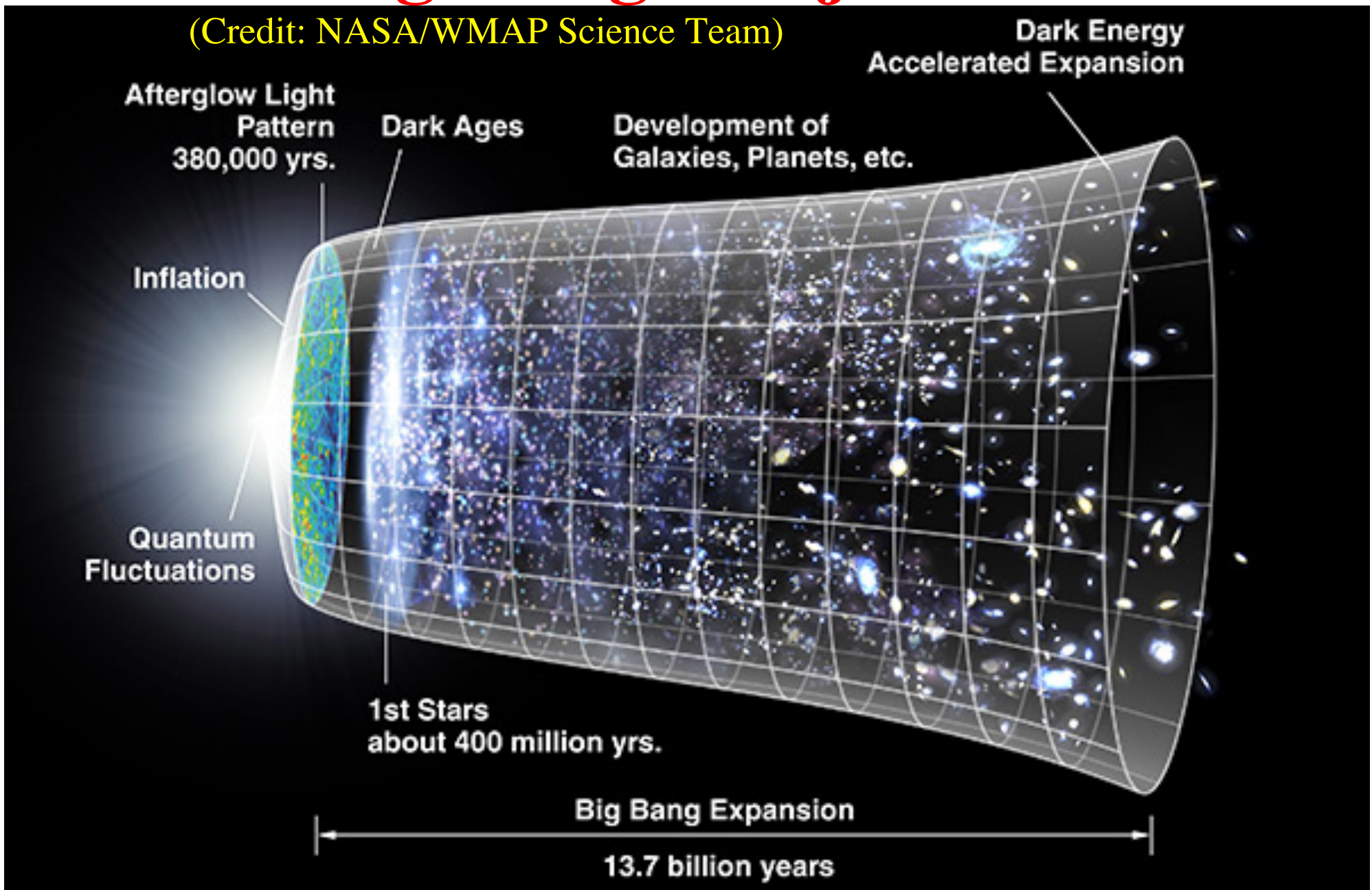
## théorie du Big-Bang



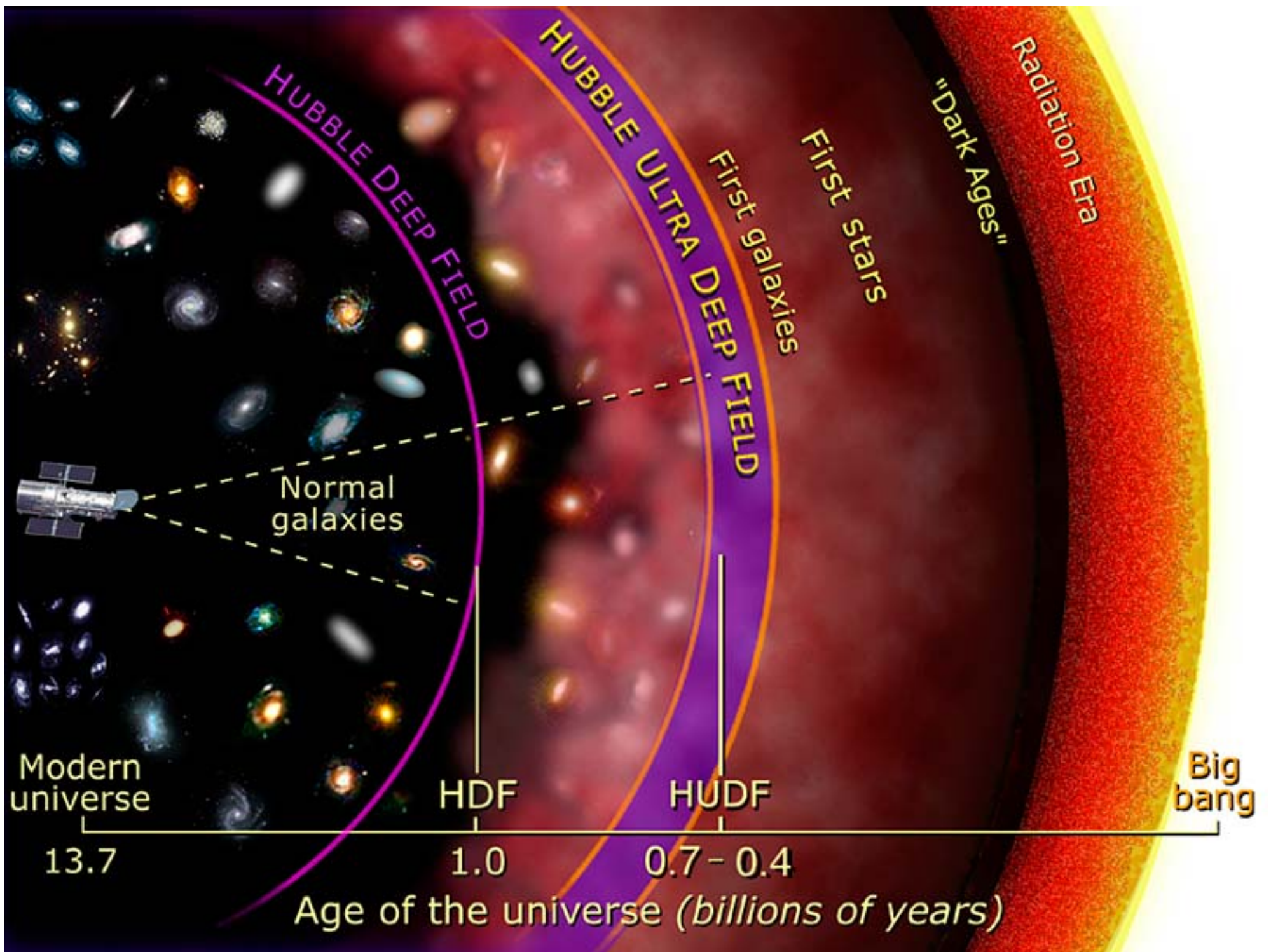
- Ces trois observations s'interprètent naturellement dans ce cadre en admettant
  - Que l'Univers est en expansion (fuite des galaxies)
  - L'existence dans le passé d'une phase chaude (rayonnement de fond)
  - D'une phase très chaude (nucléosynthèse)
- => **Maintenant, voyons plus en détail**

# Du Big-Bang à aujourd'hui

(Credit: NASA/WMAP Science Team)







# Cosmologie: l'état de l'art

- **Taux d'expansion:**  $H_0 = 67.8 \pm 0.8$  km/s/Mpc
- **Age de l'univers:**  $13,80 \pm 0,04$  milliards d'années
- **Taille de l'univers visible:** 13.8 milliards d'années lumière. La lumière émise par les objets situés au-delà ne nous est pas encore parvenue.
- **Densité moyenne:**  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>  $\Leftrightarrow$  5,7 atomes/m<sup>3</sup>
- **Dont matière.....** 30 %
- **Dont matière ordinaire.....** 5%
- **Dont matière visible.....** 0,6%

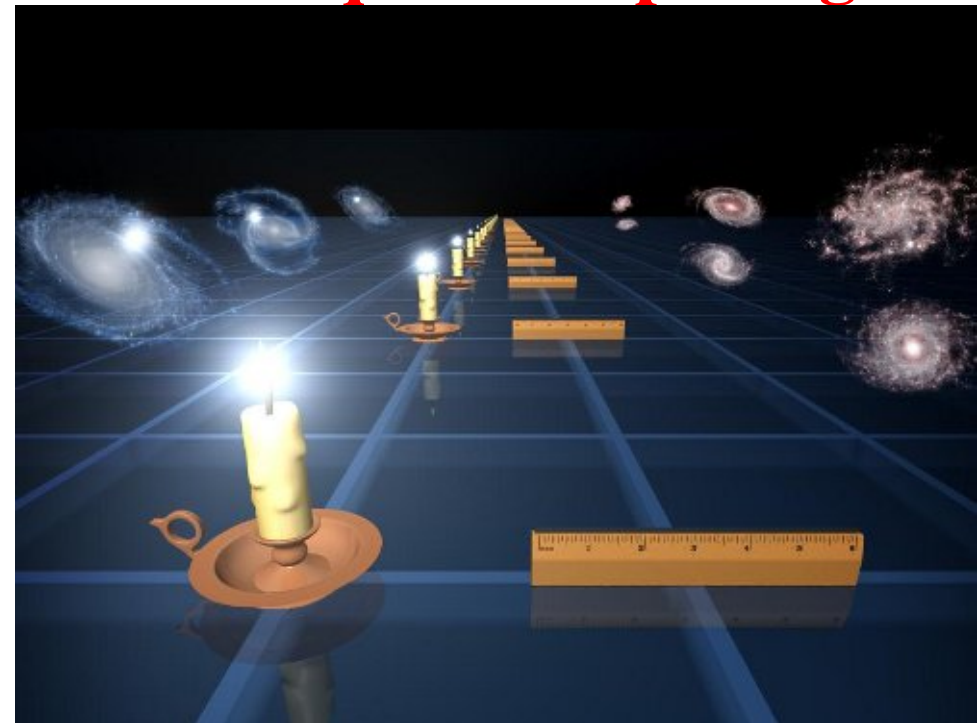
# Ce qu'on sait qu'on ne sait pas

La plupart de la masse de l'Univers est sous  
une forme inconnue

Comment le sait-on ? -> **L'art de la pesée**

Pourquoi l'expansion semble s'accélérer

Comment le sait-on ? -> **Techniques d'arpentage**



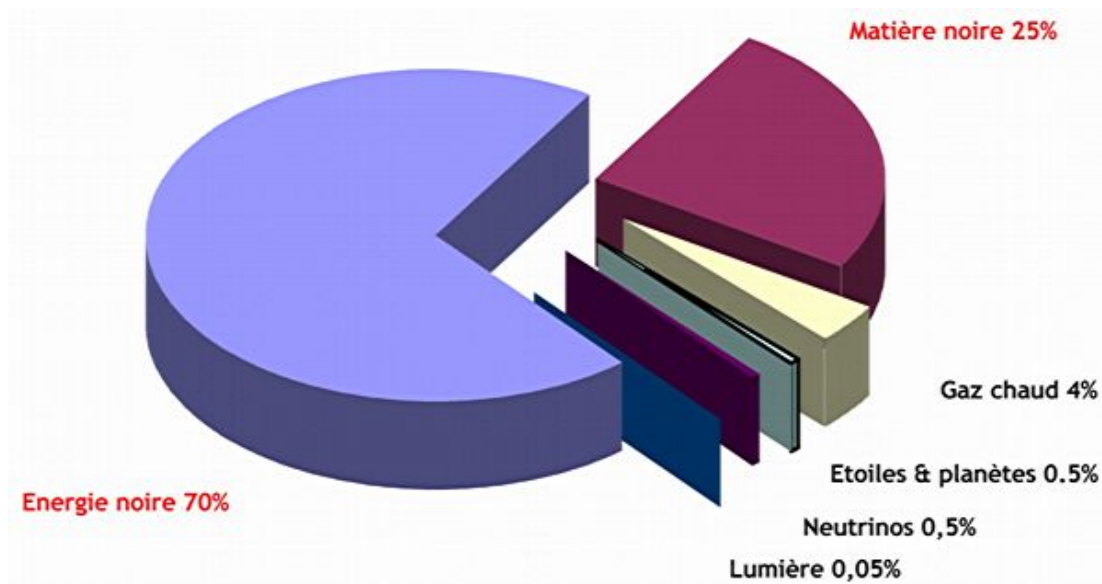
# Pesée: le contenu de l'Univers

- *Ordres de grandeur* : En moyenne, l'univers est bien plus vide que le plus poussé des vides de laboratoire  
=> sa densité moyenne (tout compris) équivaut à celle de **6 atomes/m<sup>3</sup>** ( $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>)
- *Contenu visible* : atomes (étoiles, gaz, poussières)  
+ lumière + neutrinos
  - Surtout H, He
    - Tout le reste représente une fraction négligeable

**Auguste Comte** affirmait en 1835 que l'on ne pourrait jamais connaître la composition des étoiles.

2 ans après sa mort, en 1859, l'analyse spectrale est inventée, suite aux travaux de **Fraunhofer**, qui a identifié les raies caractéristiques des éléments dans le soleil avec un spectroscope dès 1814.

# Les atomes ne représentent que 4,5% du contenu de l'Univers



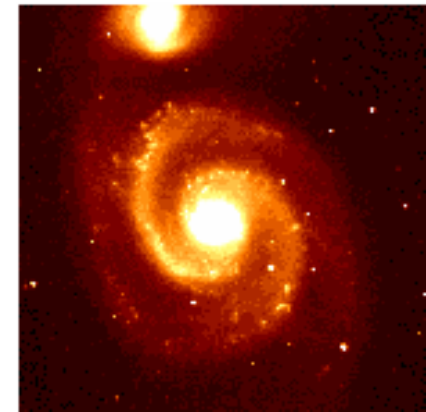
- ✓ L'univers renferme aussi de l'énergie sous forme de lumière
- ✓ Il contient aussi des neutrinos très difficiles à détecter
- ✓ Et surtout des choses encore cachées sous forme d'une **matière inconnue** et -peut-être- d'une énergie qui remplit le vide, « **l'énergie noire** »

# Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



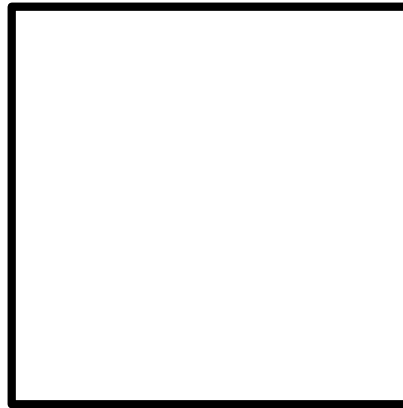
Matière sombre...



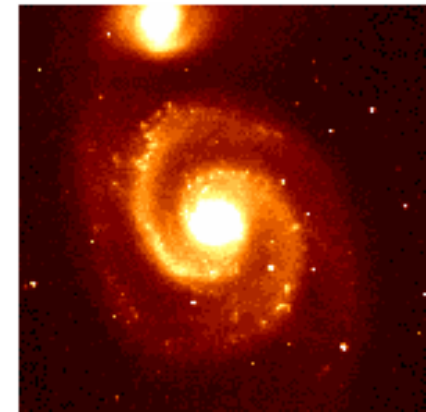
Matière  
pas sombre...  
Seulement 1% !

# Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



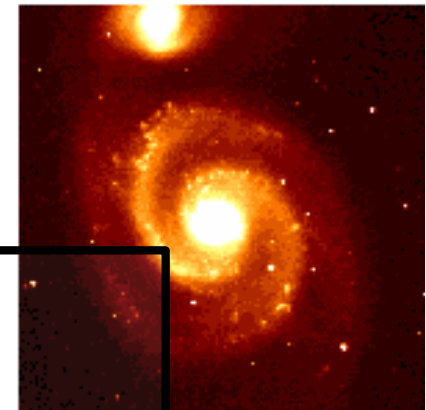
Matière cachée...



Matière  
pas sombre...  
Seulement 1% !

# Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



Matière  
pas sombre...  
Seulement 1% !

Matière cachée...



# Comment peser un tas d'oranges?

- 1<sup>ère</sup> méthode : « au jugé »

⇒ **Nombre d'oranges**

**X**

**masse moyenne d'un orange**

- 2<sup>ème</sup> méthode: à la balance

⇒ Mesure de la **force qui**

**s'exerce entre le tas et la Terre**



# Variante: comment peser une Galaxie ?



- 1<sup>ère</sup> méthode : « au jugé »

⇒ **Nombre d'étoiles ( $10^9$  à  $10^{12}$ ) x**  
**masse moyenne d'une étoile**

Etude de la  
lumière émise

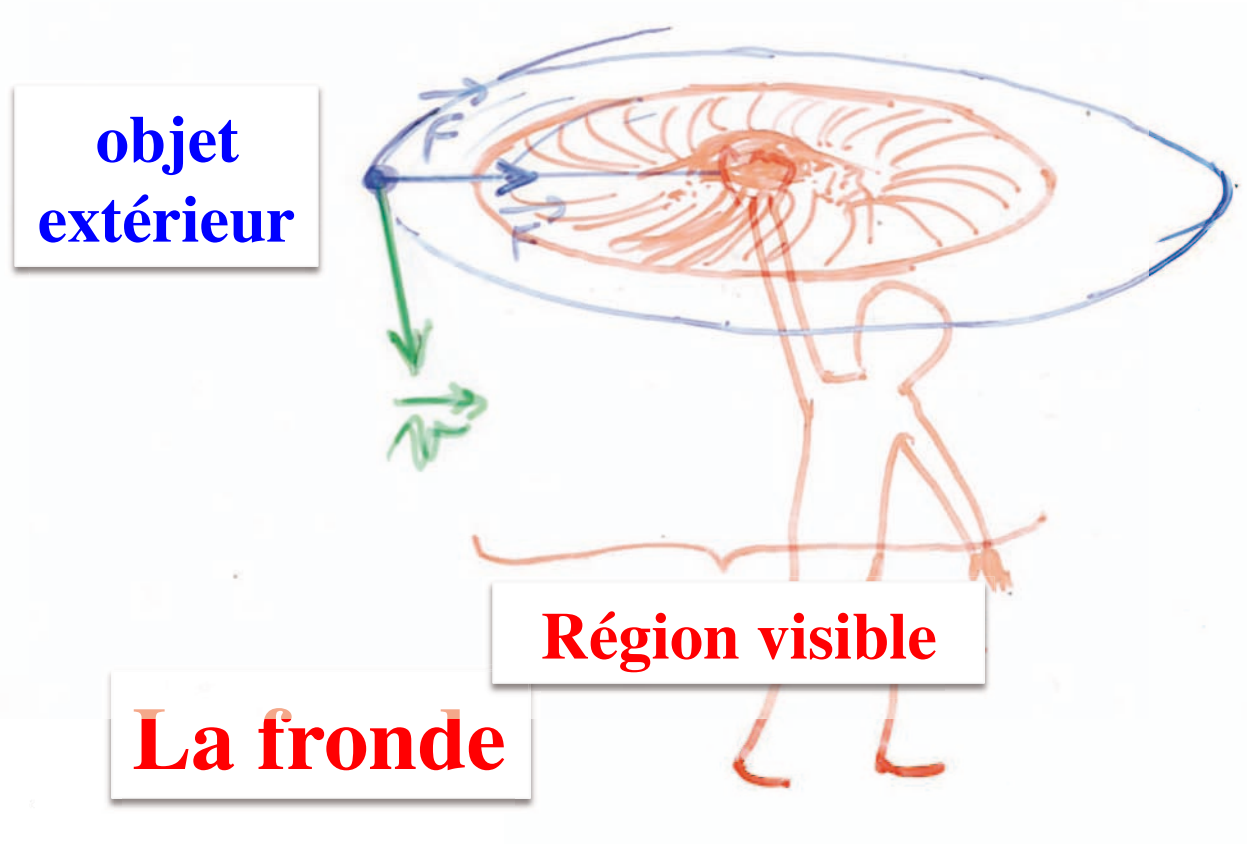
**+ GAZ + POUSSIÈRES**

Etude de la lumière  
émise ou absorbée

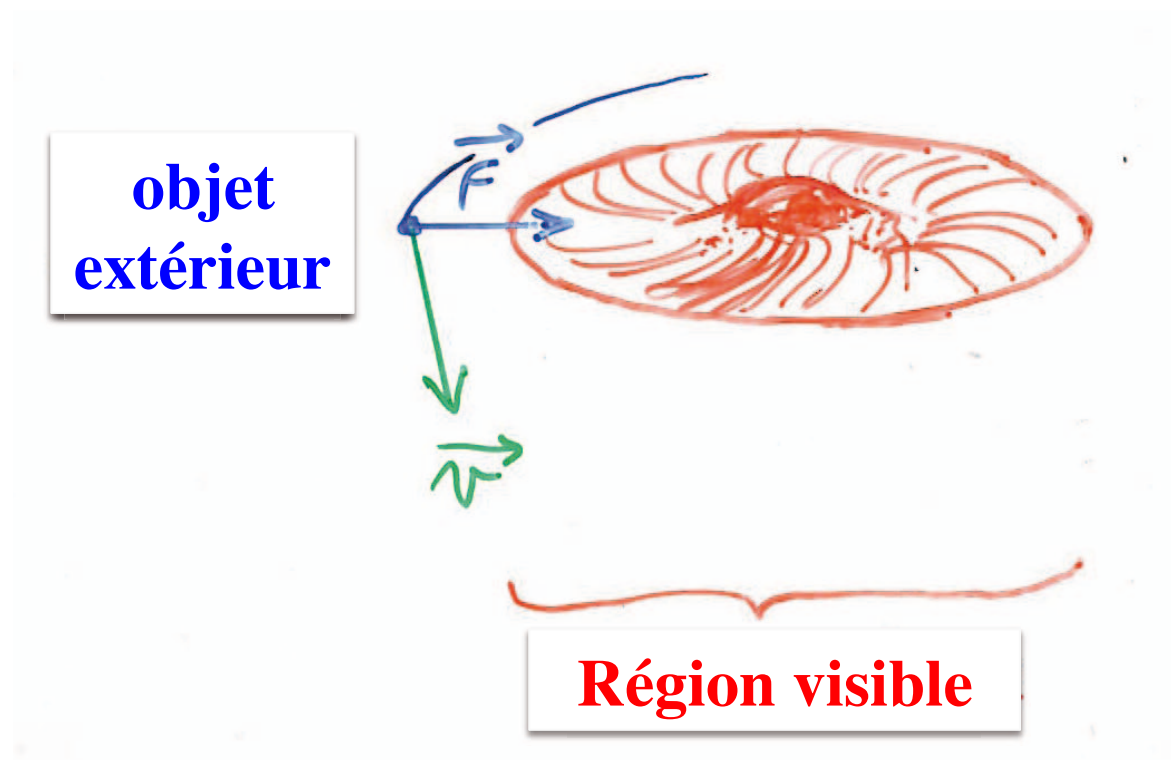
- 2<sup>ème</sup> méthode: à la balance

⇒ Mesure des **forces de gravitation qui**  
**s'exercent entre la galaxie et des objets**  
**extérieurs**

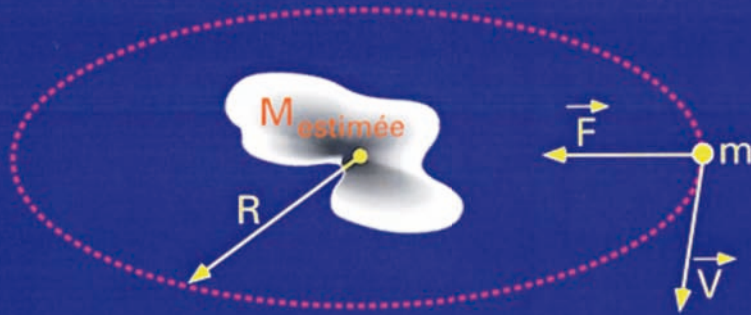
# Comment estimer ces forces de gravitation?



# Comment estimer ces forces de gravitation?

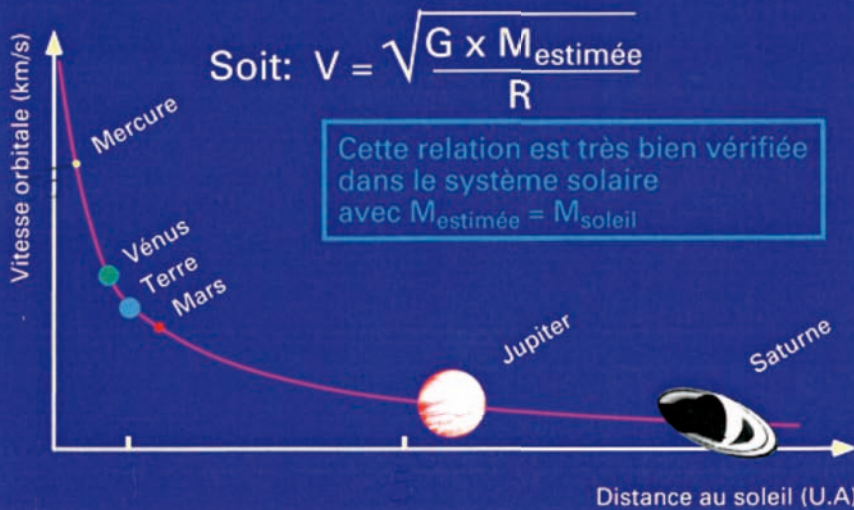


# MESURE DYNAMIQUE D'UNE MASSE



Pour que m soit en rotation uniforme autour de l'objet  $M_{estimée}$  il faut:

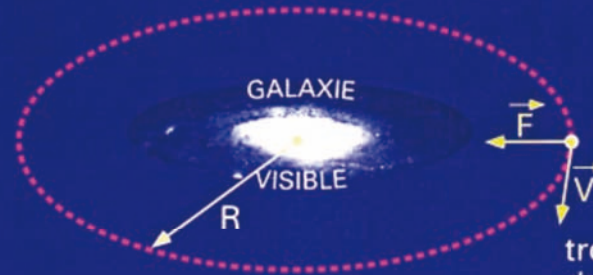
$$F_{Gravitation} = G \times \frac{M_{estimée} \times m}{R^2} = F_{Centripète} = m \times \frac{V^2}{R}$$



ça ne marche pas dans les GALAXIES si on prend :

$$M_{estimée} = M_{étoiles} + M_{poussières} + M_{gaz}$$

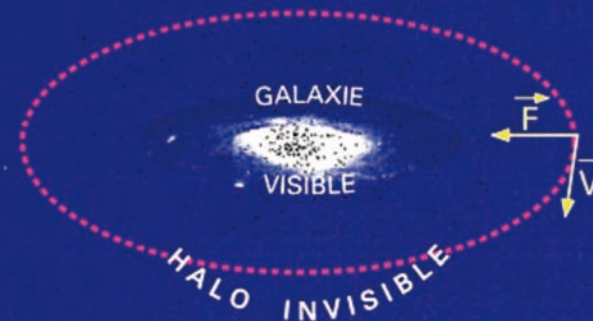
éléments "visibles"



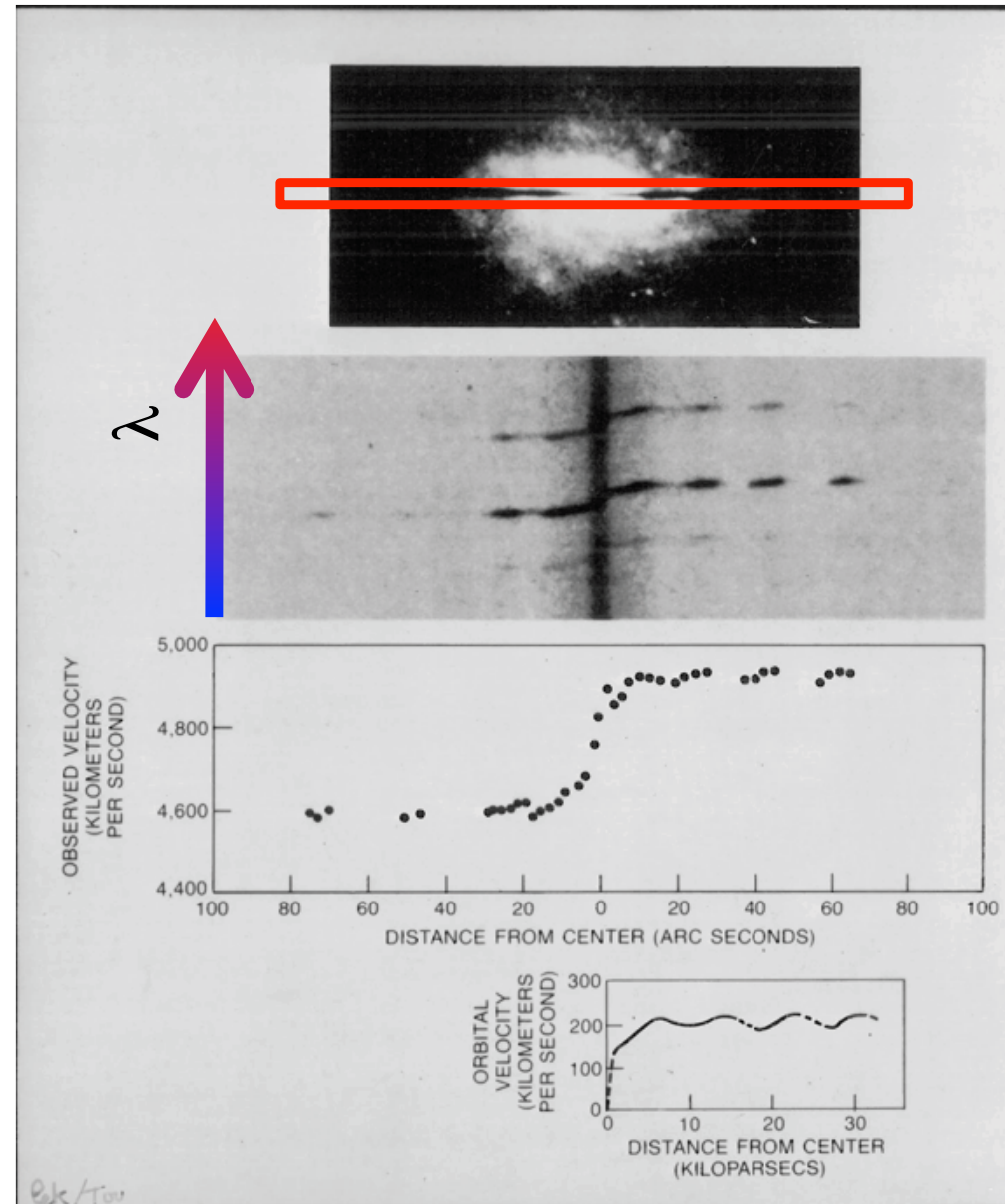
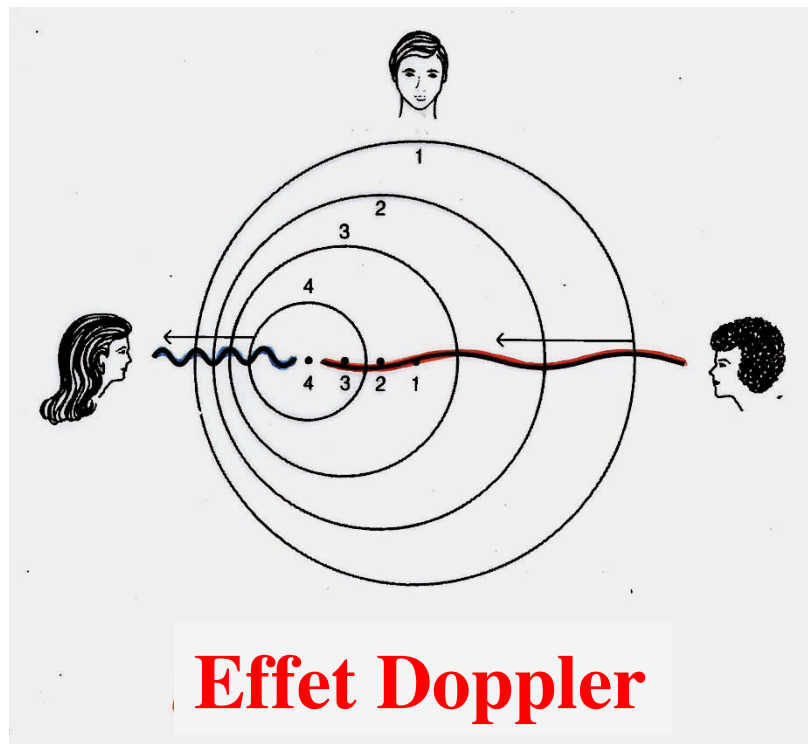
trop grand devrait diminuer dès que  $R > R_{visible}$

$M_{estimée}$  est fausse

explication plausible

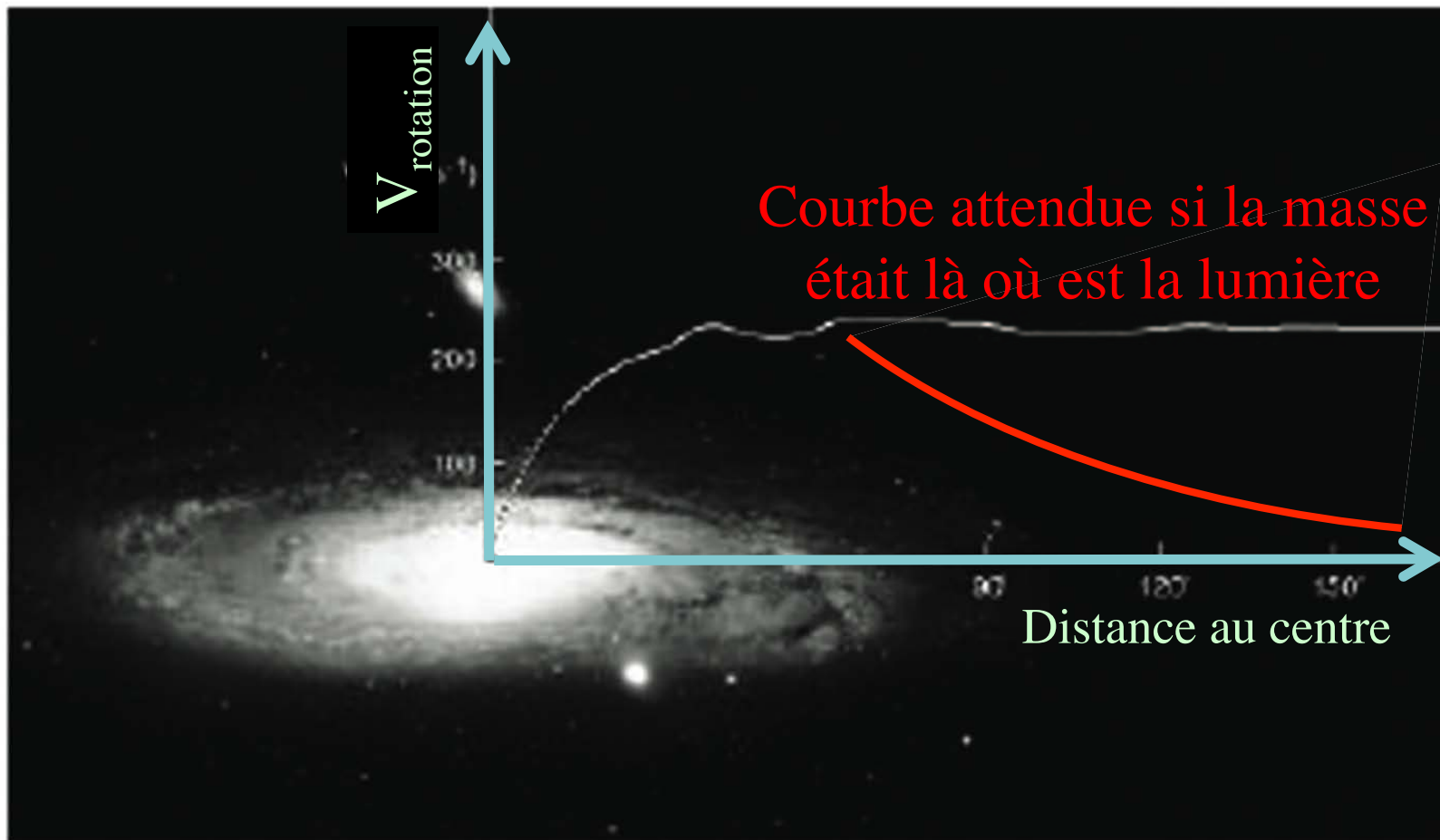


# Mesure de la vitesse orbitale des étoiles ou du gaz externes



Bjk/Tur

# Courbe de rotation de la galaxie d'Andromède



**L'estimation visuelle (10kg) et la balance (100kg) sont en désaccord**

**Qu'y a-t-il dans le cageot ?**





# Qu'y a-t-il dans le cageot ?

## Jargon d'astronome

- Fonction de masse initiale?
- Des trous noirs à la place des étoiles?
- Quelque chose qu'on ne voit pas entre les étoiles?

## Traduction en langage de tout le monde

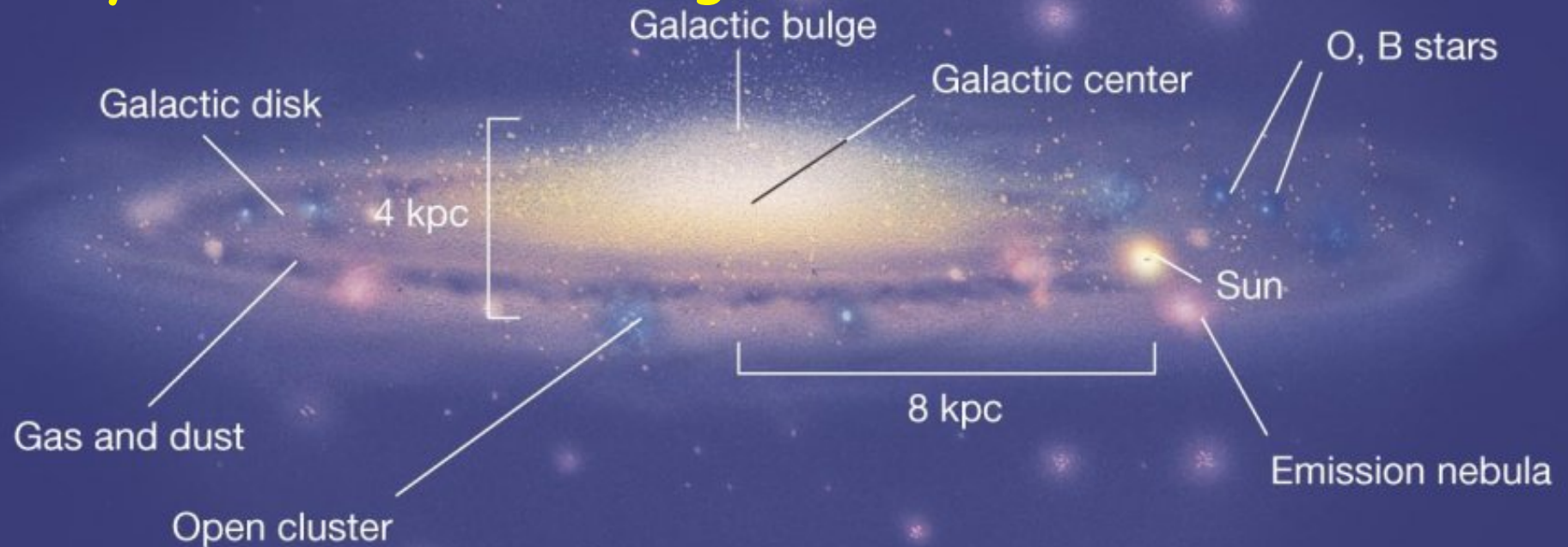
- Erreur de comptage?
- Des boulets de canon peints en orange?
- Quelque chose qu'on ne voit pas entre les oranges?

# Matière cachée galactique

Galactic halo

Globular clusters

Elle pourrait s'étendre sur un rayon 5 fois supérieur au rayon observable de la galaxie.



Mais de quoi est-elle constituée : - gaz ?  
- étoiles sombres ?  
- particules exotiques ?

30 kpc

Une autre indication de l'existence de matière cachée:  
**Déflexion de la lumière émise par  
des galaxies lointaines**



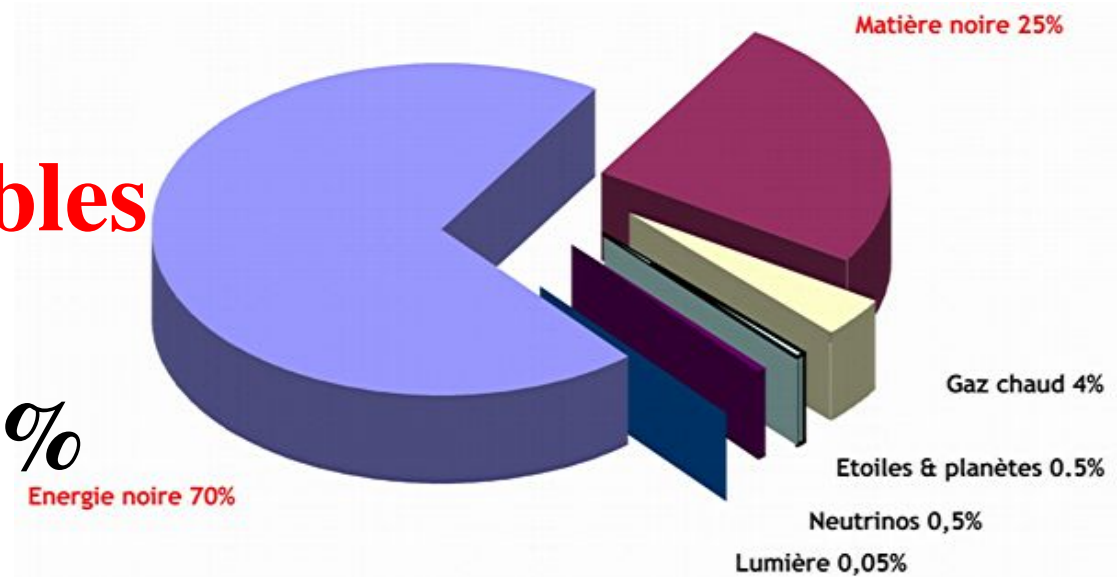
# Où se cachent les atomes invisibles aujourd'hui?

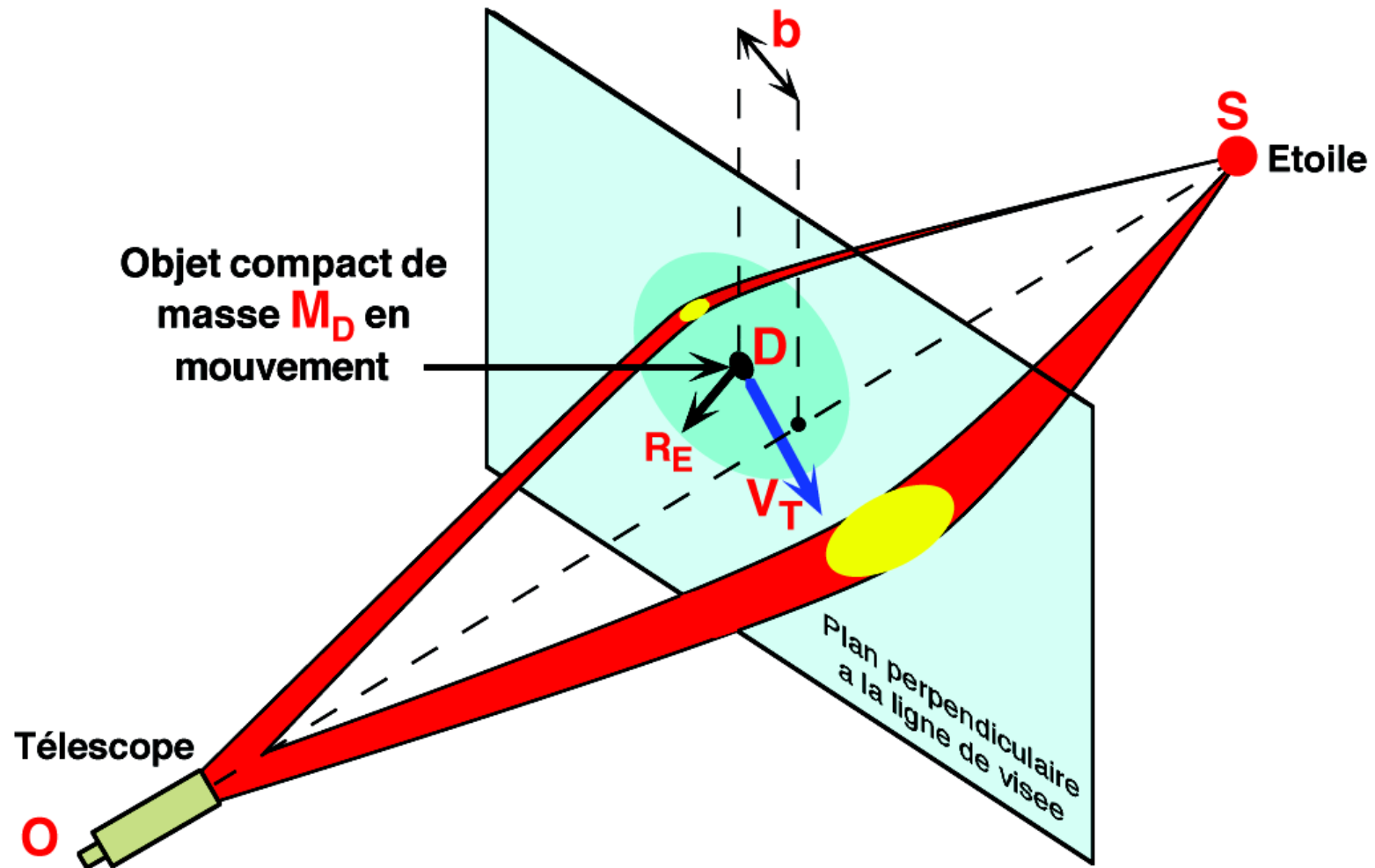
1- De 0,6% à 4,5%

- Objets compacts?

- Étoiles « manquées » de  $10^{-7}$  à  $10^{-1}$  Masse solaire

**==> EROS: Expérience de recherche d'Objets Sombres.  
Recherche les effets de microlentilles gravitationnelles**

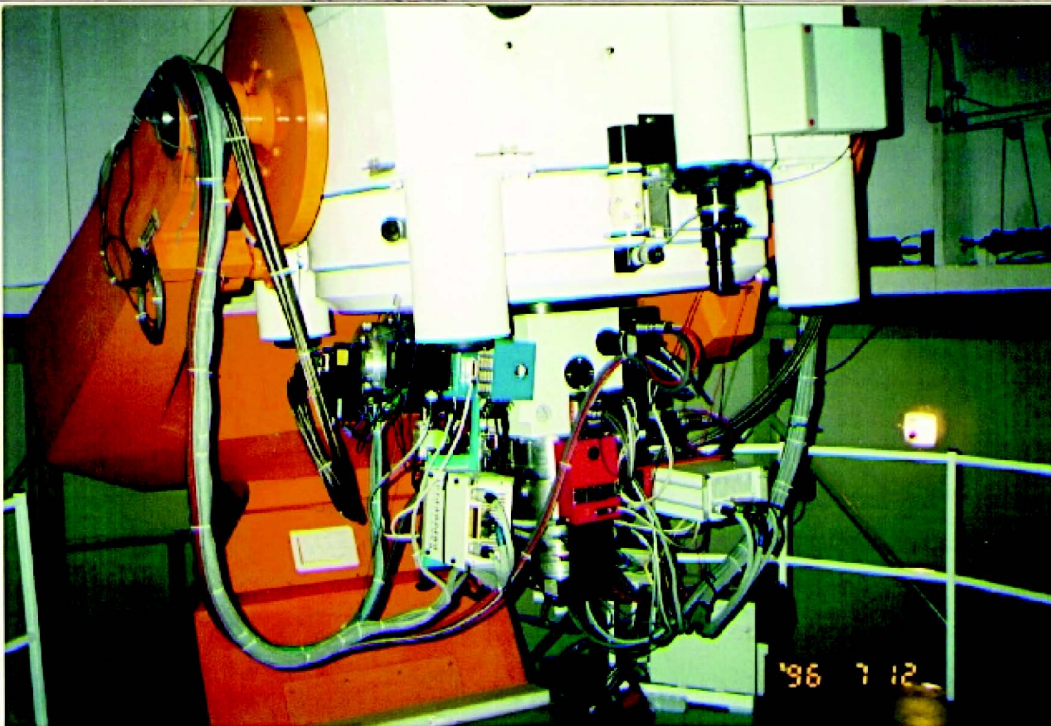




# L'EFFET DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE

# Expérience de Recherche d'Objets Sombres

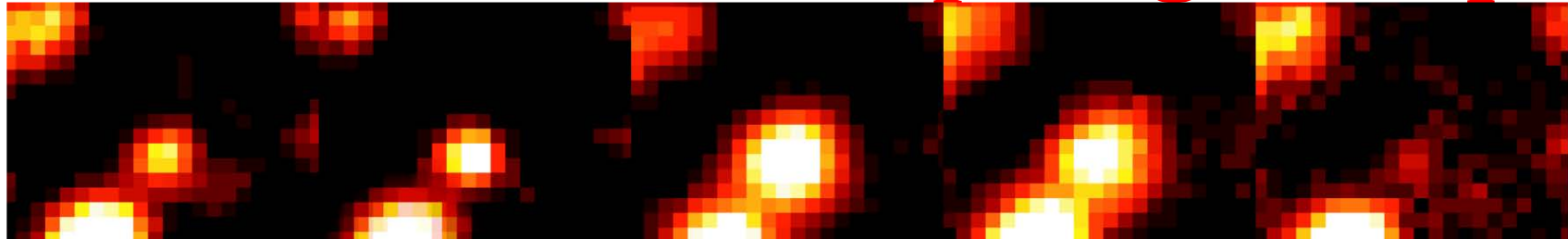
- Télescope de 1m au Chili
- caméras grand champ **R** et **B** de 32Mpix chacune
- 7 ans de fonctionnement
- $\sim 10^8$  étoiles mesurées 300 à 500 fois (événements rares)
- **EROS1: 1990-1995**  
**EROS2: 1996-2002**



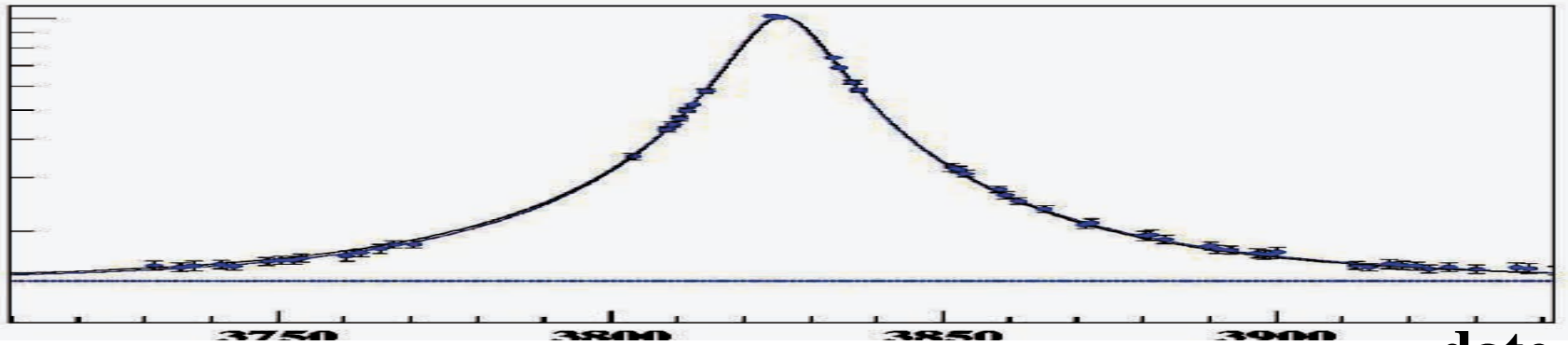
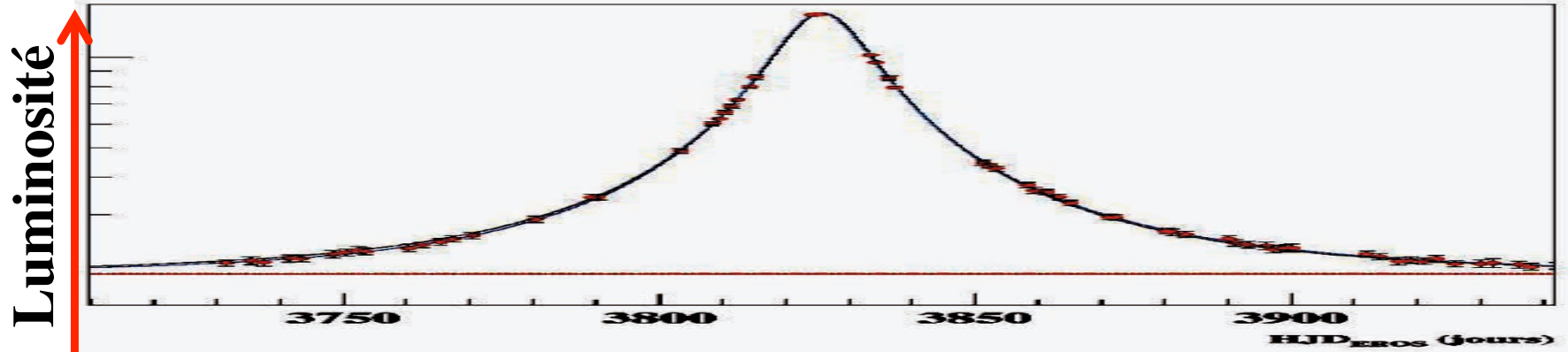
Сергей 93.



# Un événement vers le plan galactique



Quart m



date





# Les résultats

- Beaucoup d'événements ont été détectés
- Mais très peu sont dus à de la matière cachée  
=> sévères limites sur la contribution des objets compacts au halo de matière cachée

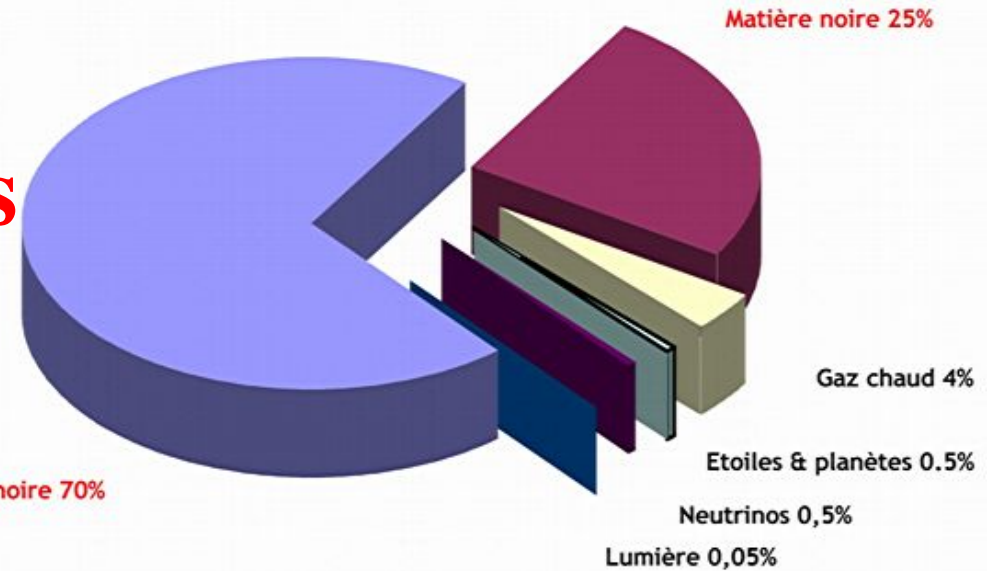
## Un résultat négatif, c'est un progrès

- Comme pour une enquête policière, on élimine des suspects

# Où se cachent les atomes invisibles aujourd'hui?

1- De 0,6% à 4,5%

Energie noire 70%



- Objets compacts?

- Étoiles « manquées » de  $10^{-7}$  à  $10^{-1}$  Masse solaire

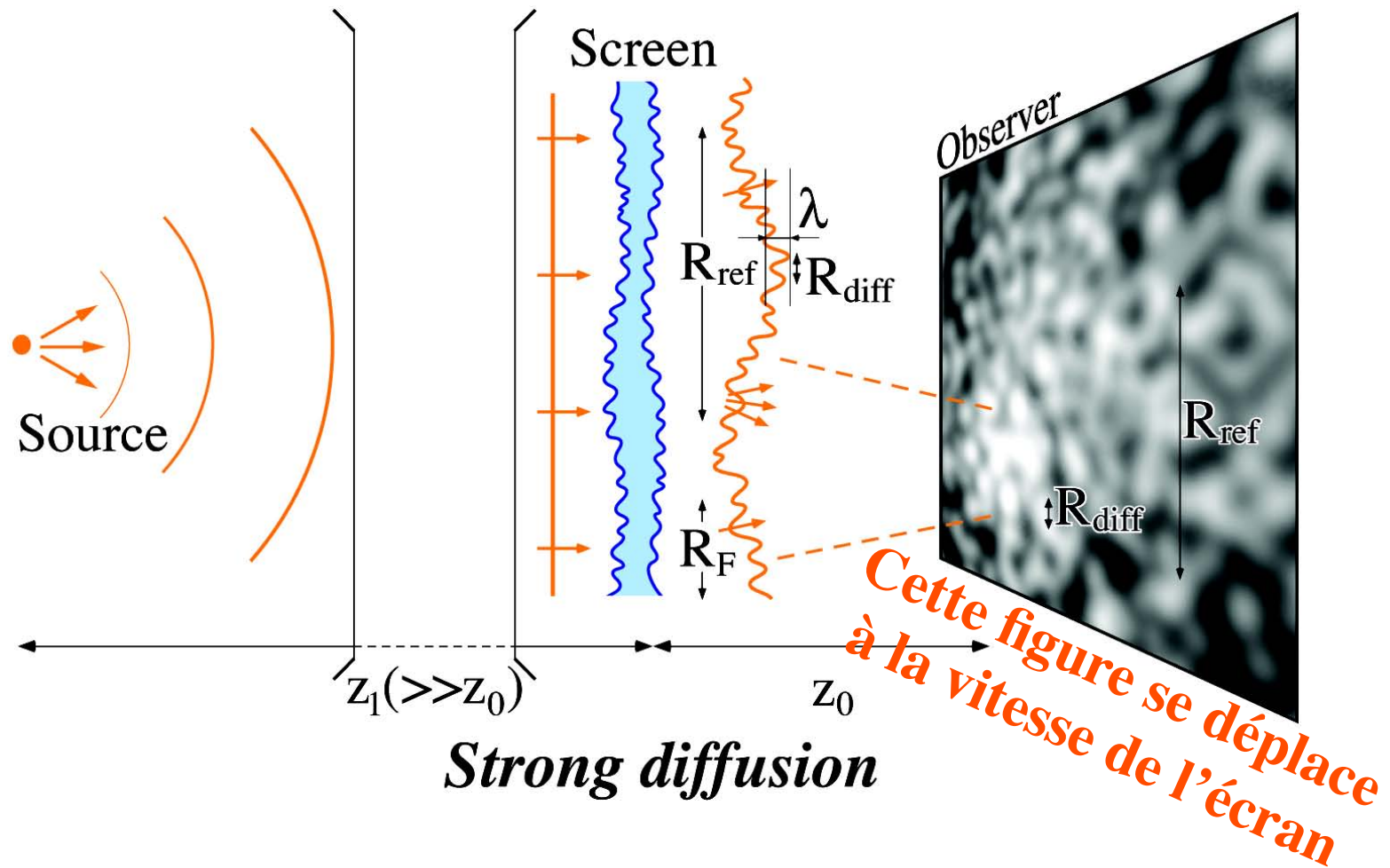
- ==> EROS: Expérience de recherche d'Objets Sombres. Recherche les effets de microlentilles gravitationnelles**

- Gaz

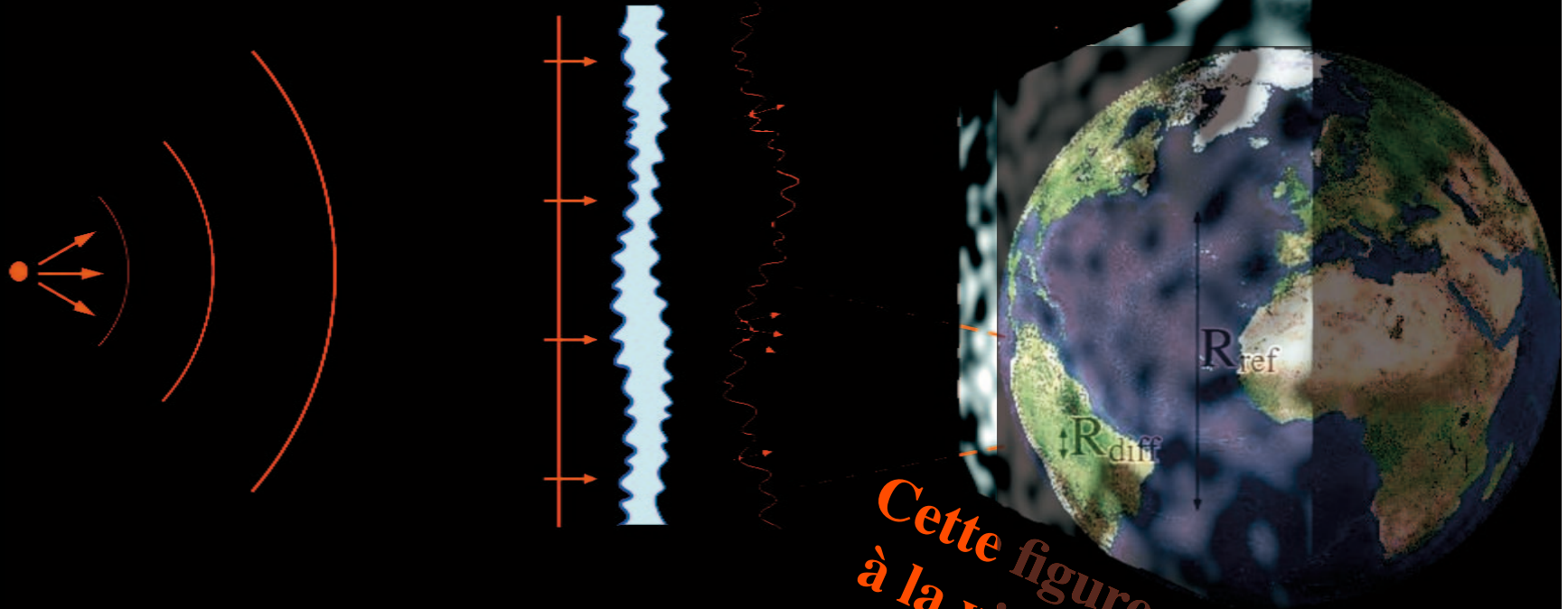
- Nuages de  $H_2$  de structure fractale de  $\sim 10^{-3}$  Masse solaire

- ==> OSER: Optical Scintillation by Extraterrestrial Refractor. Recherche d'effets de scintillation interstellaire**

# Scintillation due to a strongly diffusing screen

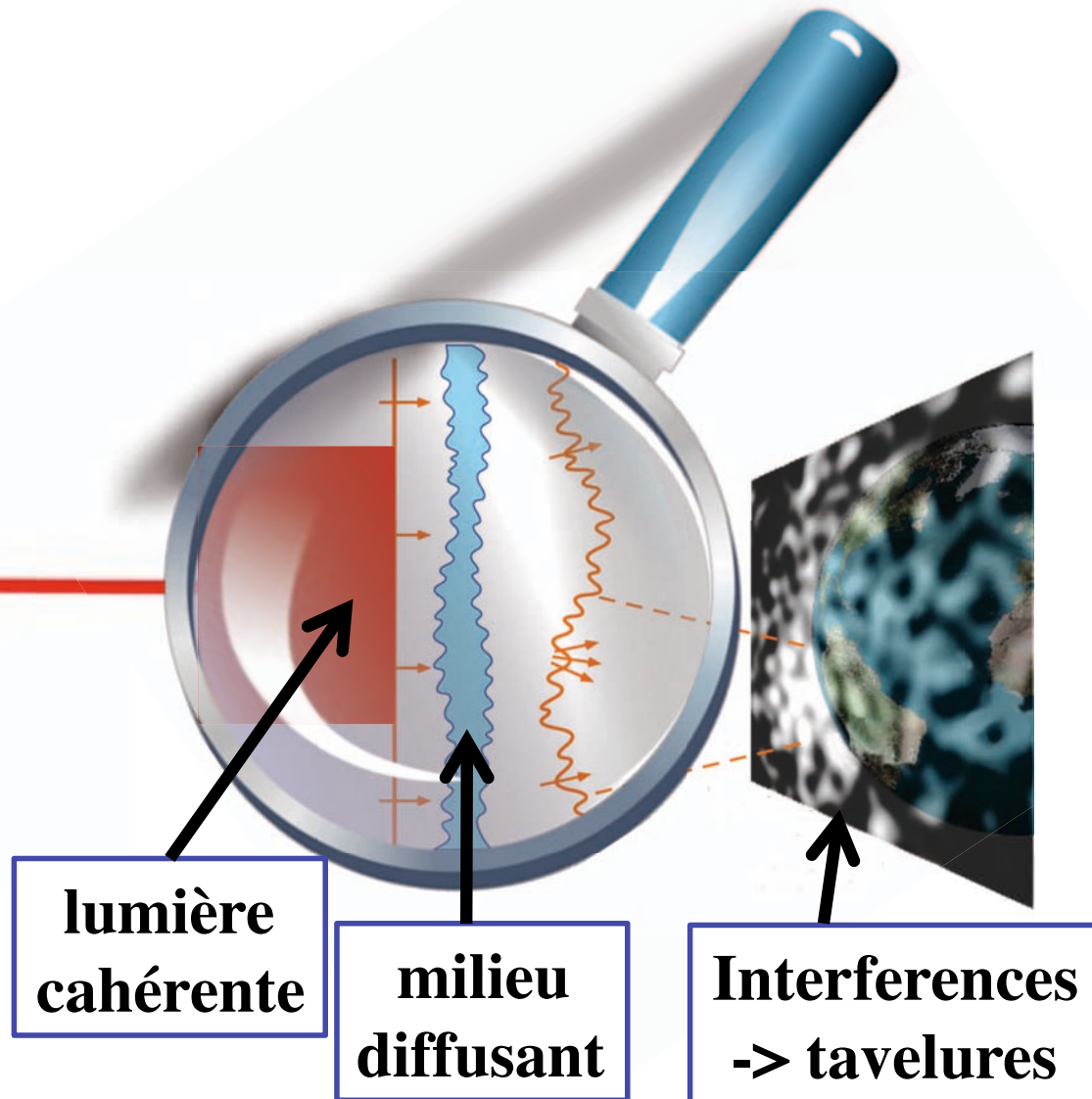


# Scintillation due à un écran fortement diffusant



*Cette figure se déplace  
à la vitesse de l'écran*

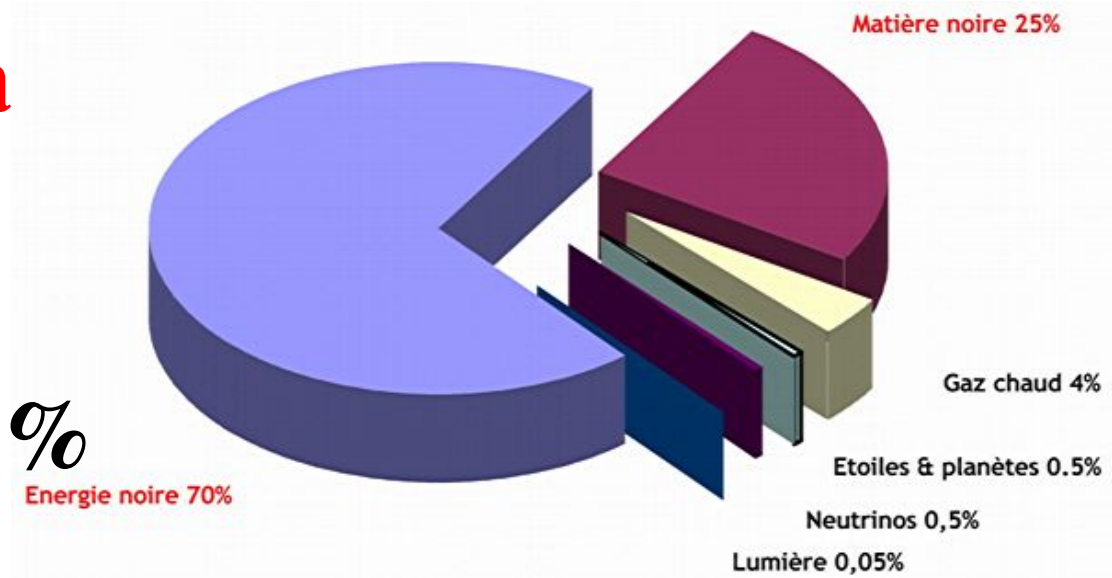
# Demonstrateur





# Qu'est-ce que la matière non atomique?

2- De 4,5% à 30%



- Le **neutrino** ? Non, beaucoup trop léger.
- De nouvelles particules, les **WIMPs** prédites par certaines théories ?

**WIMP** = Weakly Interacting Massive Particle

Leur flux sur Terre serait de

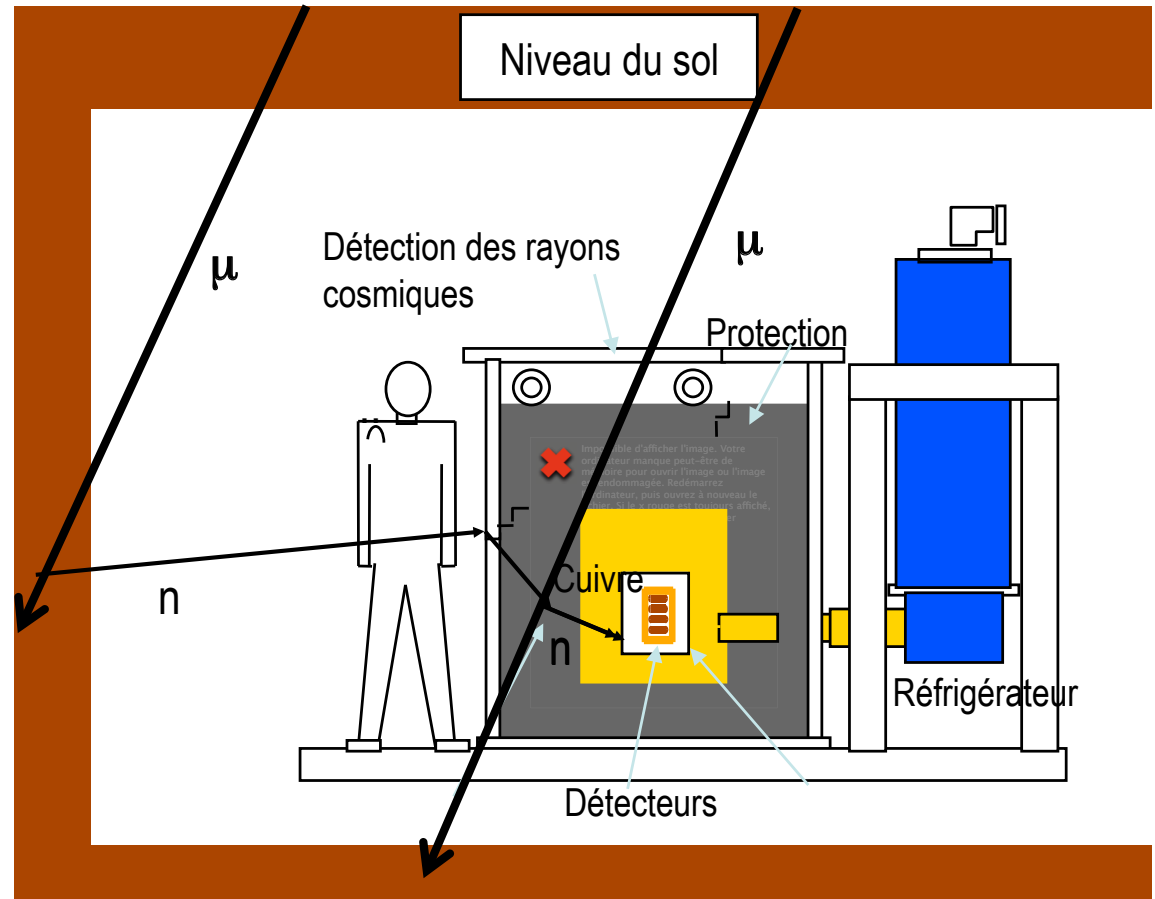
$10^6 \cdot [M_{\text{WIMP}}/1\text{GeV}]^{-1}$  par  $\text{cm}^2$  et par s

# Détecter les WIMPs (1)

Détecter les WIMPs est très difficile, en raison de leur faible interaction avec la matière : moins d'un choc par mois et par kilogramme.

Limites à la détection :

- rayonnement cosmique,
- radioactivité induite par les rayons cosmiques et radioactivité naturelle.



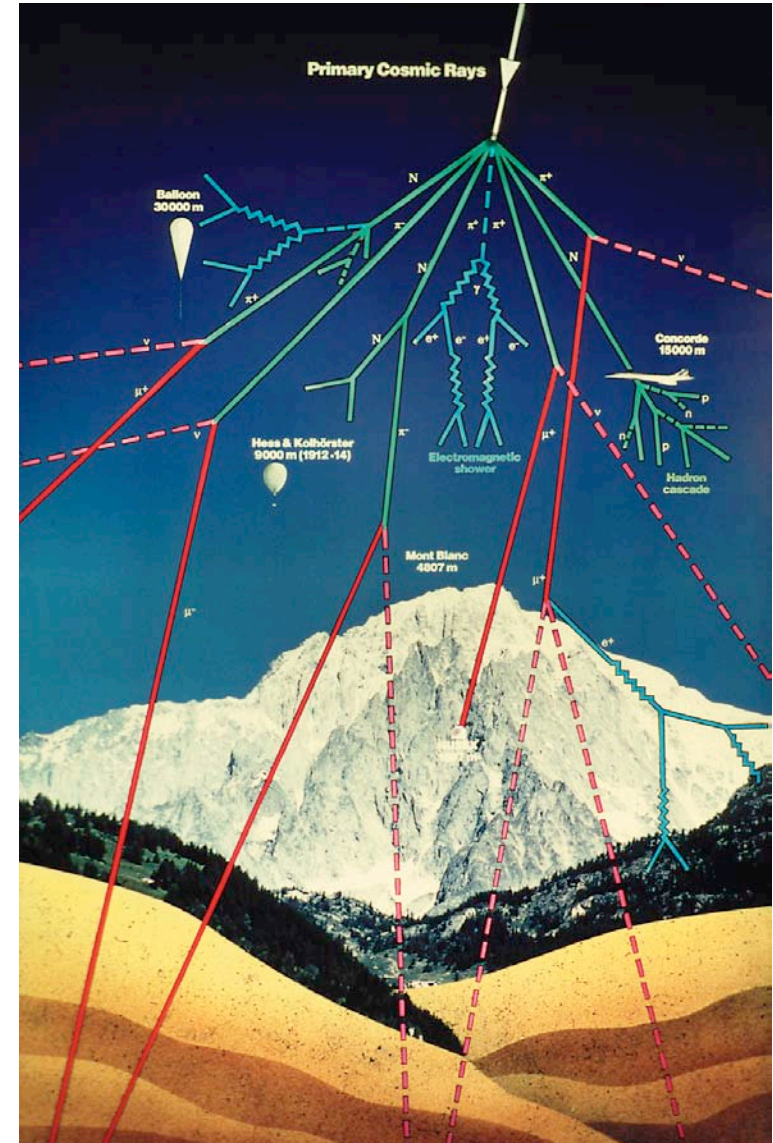
L'expérience américaine CDMS a souffert du rayonnement cosmique. Elle utilise maintenant un site souterrain.



# Détecter les WIMPs (2)

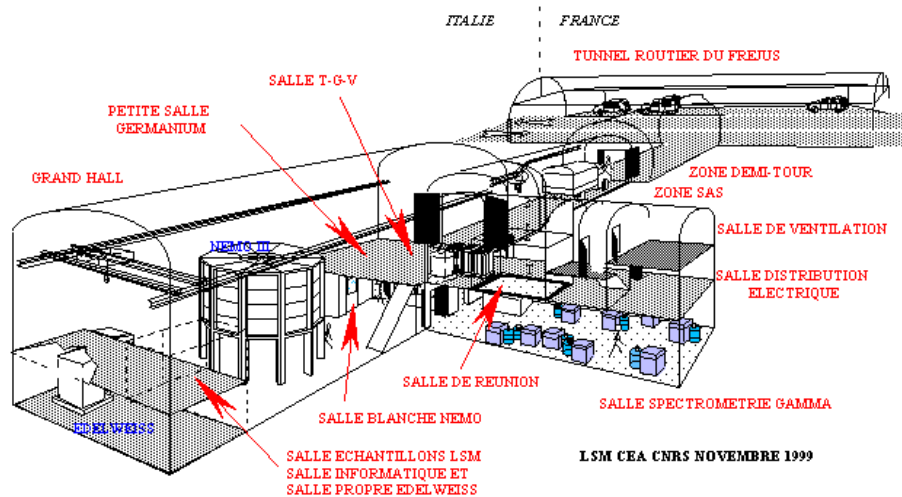
Pour améliorer la sensibilité des expériences, il faut :

- se cacher sous une montagne pour se **protéger des rayons cosmiques** (100 par seconde traversent notre corps),
- se protéger de la radioactivité naturelle des roches,
- purifier les matériaux des détecteurs.



# Edelweiss et CDMS

L'expérience française  
**EDELWEISS** est  
abritée sous plus de  
1600 m de roche, dans  
les Alpes.



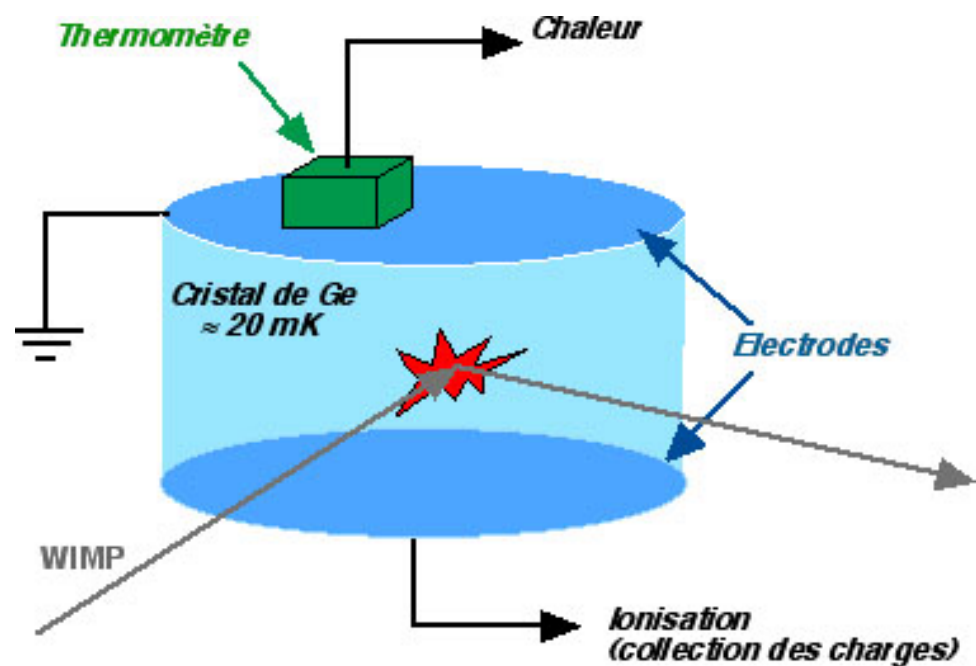
Le laboratoire souterrain de Modane. Moins d'un millionième des rayons cosmique parviennent à l'atteindre.

Son concurrent américain CDMS est abrité dans la mine de fer de Soudan (États-Unis).



# Le détecteur d'EDELWEISS (1)

Dans le détecteur d'EDELWEISS, le choc d'un WIMP :



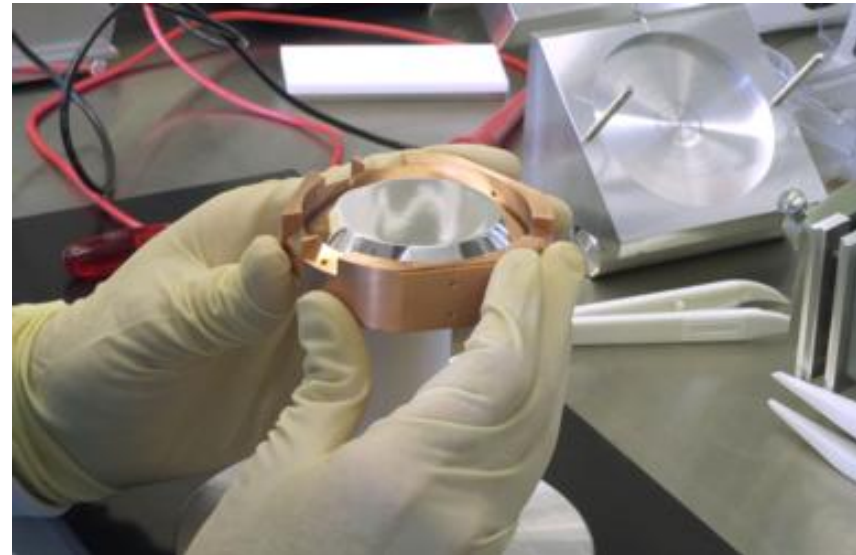
Détecteur d'EDELWEISS

- élève un tout petit peu la température (1 millionième de degré !),
- engendre un signal électrique (quelques centaines d'électrons)  
3 fois plus petit que dans le cas de la radioactivité (pour une même énergie transmise au matériau du détecteur)

# Le détecteur d'EDELWEISS (2)

Dans le détecteur : des matériaux extrêmement purs, une température d'un centième de degré absolu.

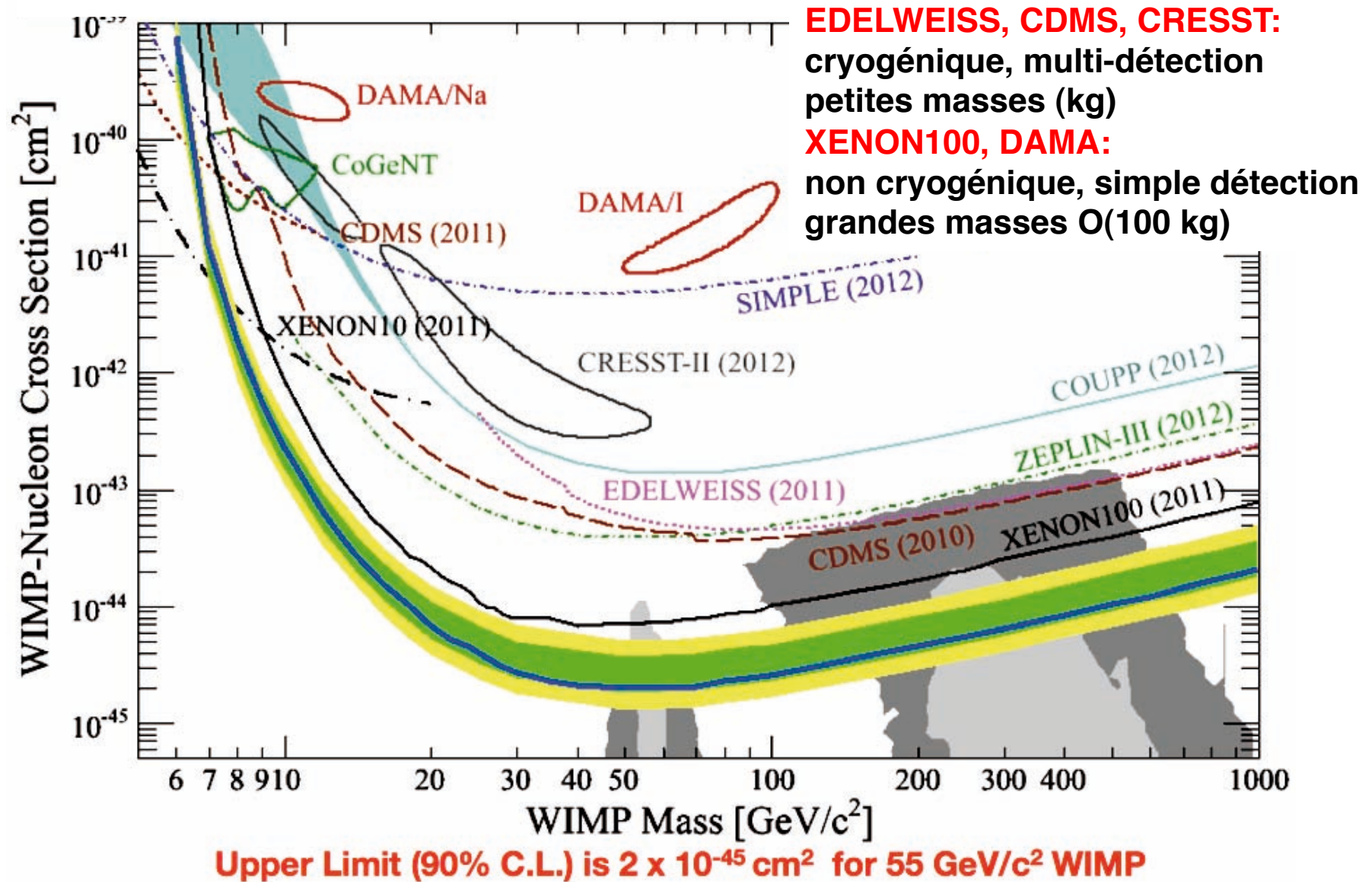
**EDELWEISS**  
a commencé à explorer le  
domaine des **WIMPs...**



Détecteur en germanium  
de l'expérience EDELWEISS

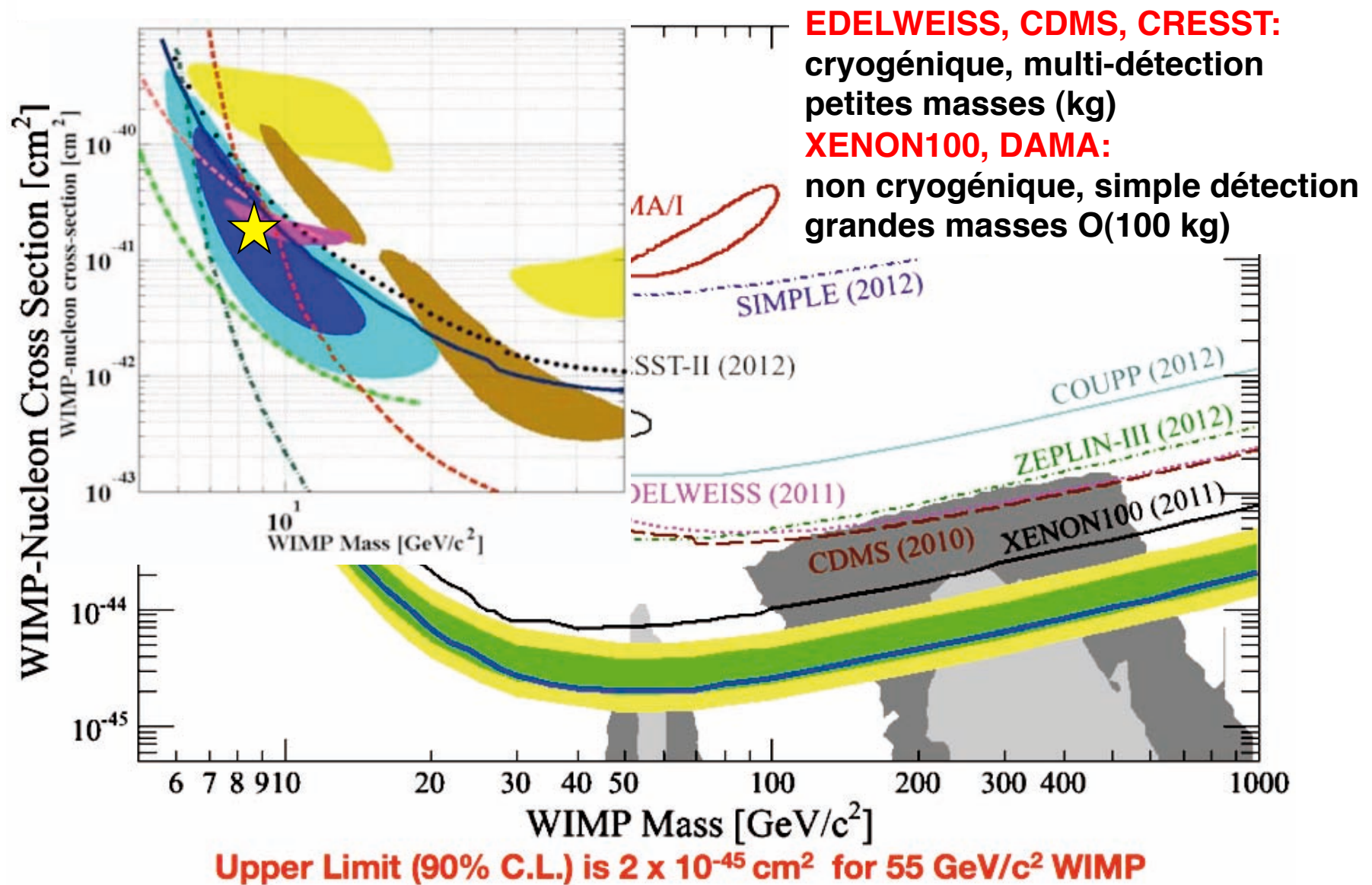
# Recherches directes de WIMPS

(physique souterraine)



# Recherches directes de WIMPS

(physique souterraine)



# L'énergie noire

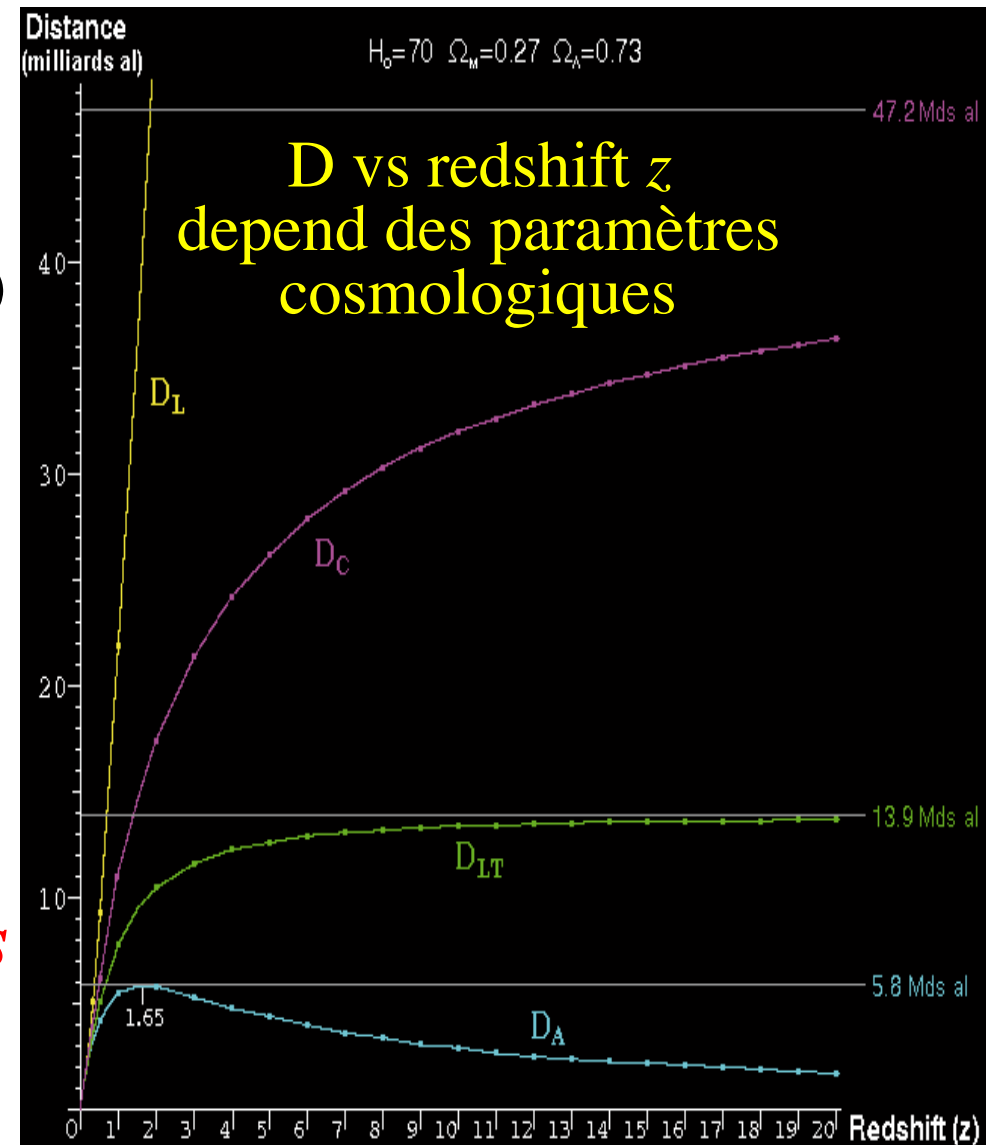
## Pourquoi cette hypothèse?

- Tout vient de l'observation que l'expansion de l'Univers semble s'accélérer
- Les supernovae (de type 1a) sont des étalons de luminosité utilisés pour estimer des distances
- les plus lointaines apparaissent 20 à 30% trop peu lumineuses par rapport à ce que prédit la relation de Hubble pour un Univers plat



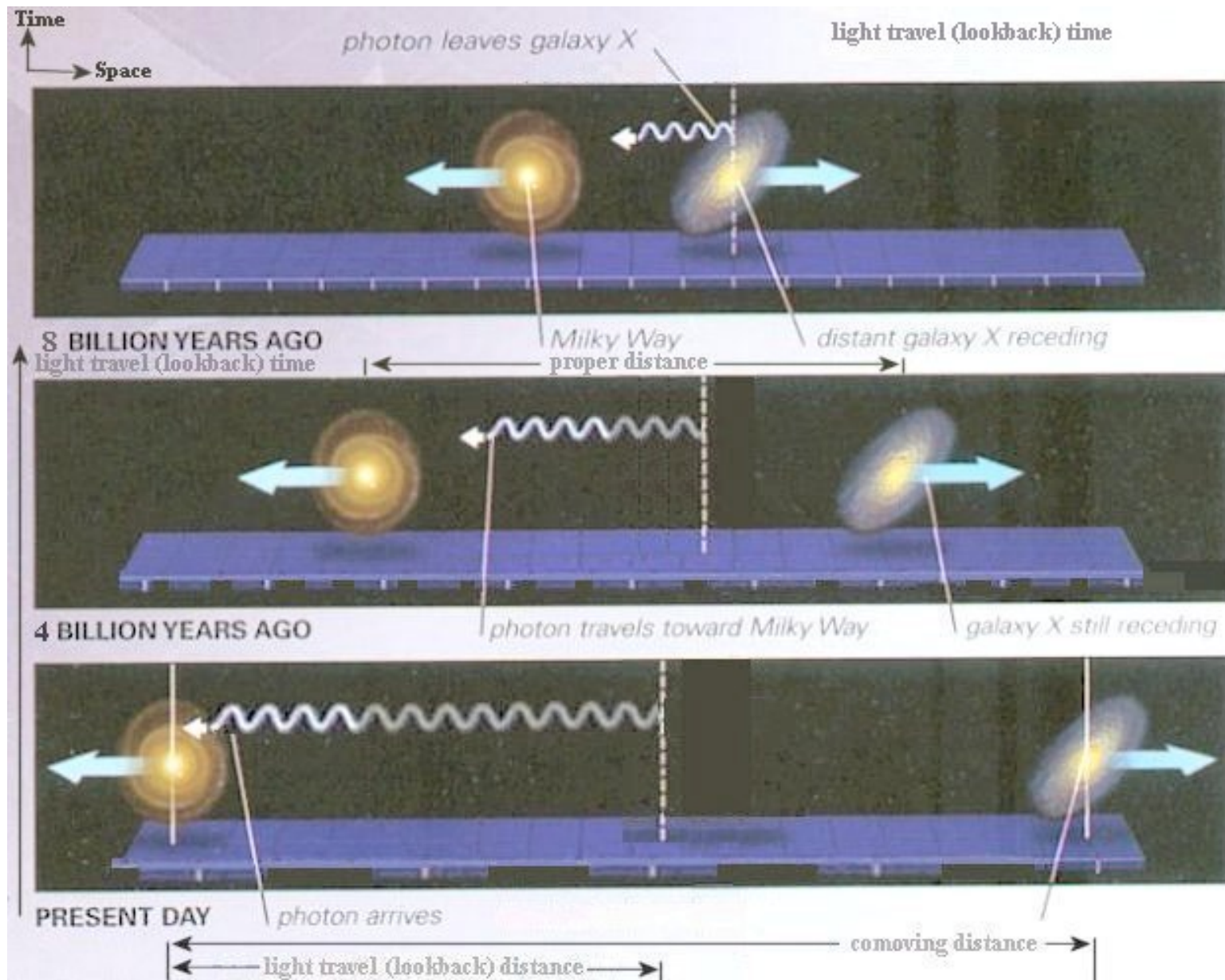
# Arpentage: 4 distances cosmologiques pour arpenter un univers en expansion

- *Distance comobile*  $d_C$   
Donne la position actuelle de l'objet (même observé dans une situation passée)
- *Distance de luminosité*  $d_L = d_C(1+z)$   
liée à la surface de répartition de la lumière
  - Utilisée avec les chandelles standard
- *Les galaxies apparaissent **moins brillantes** que dans un univers statique*
- *Distance angulaire*  $d_A = d_C/(1+z)$   
Les galaxies étaient plus proches à l'époque de l'émission de la lumière
  - Utilisée avec les règles standard
- *Les galaxies apparaissent **plus grandes** que dans un univers statique*
- *Distance de propagation de la lumière*  $d_{LT}$

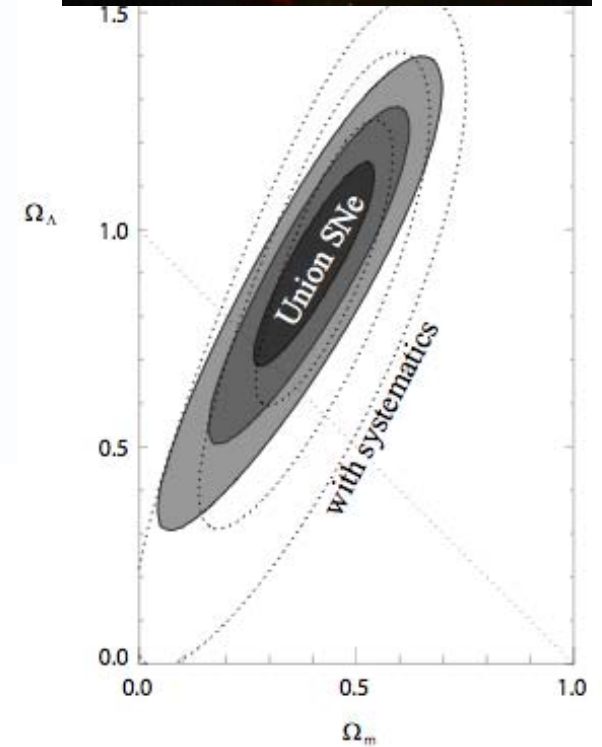
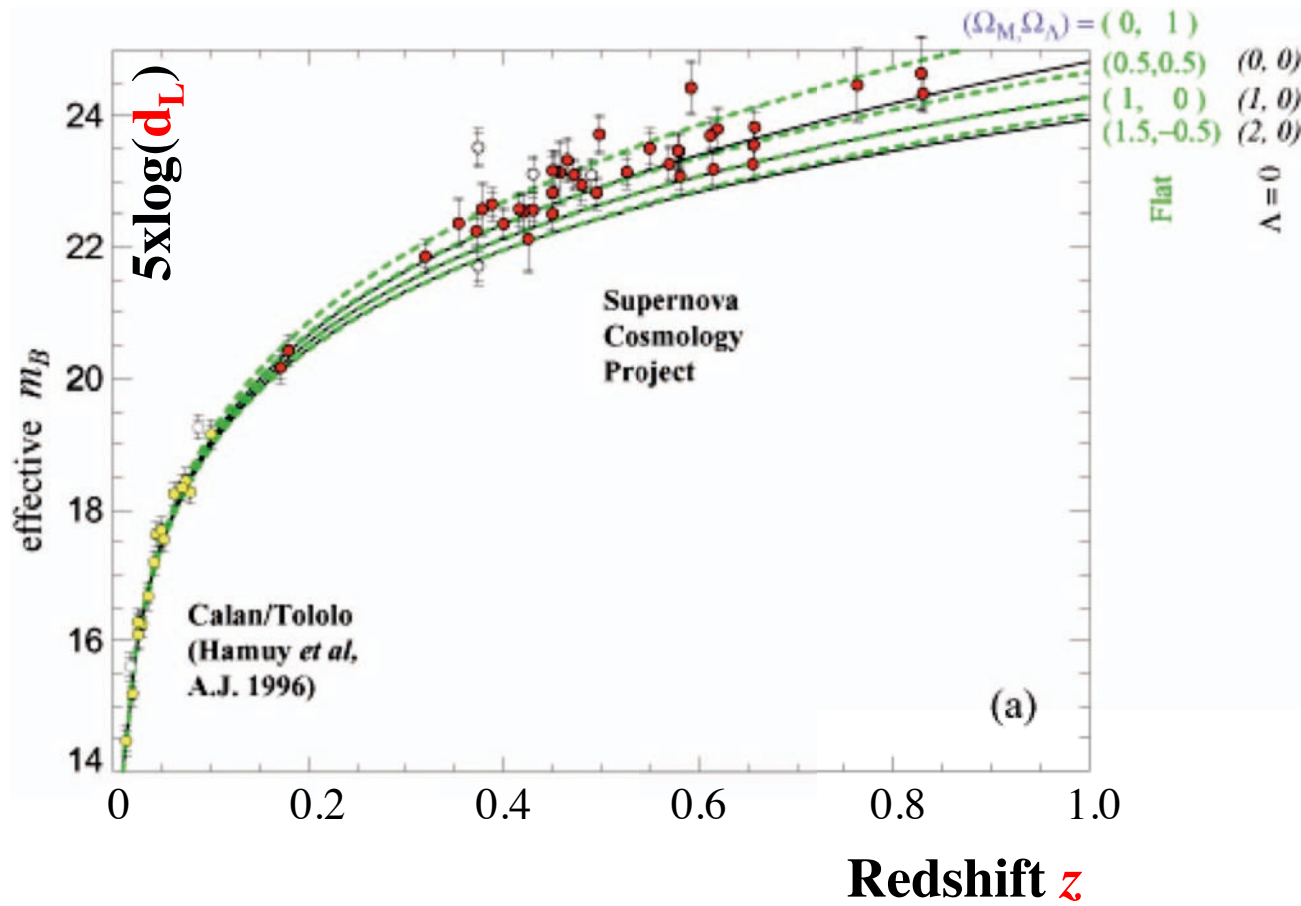




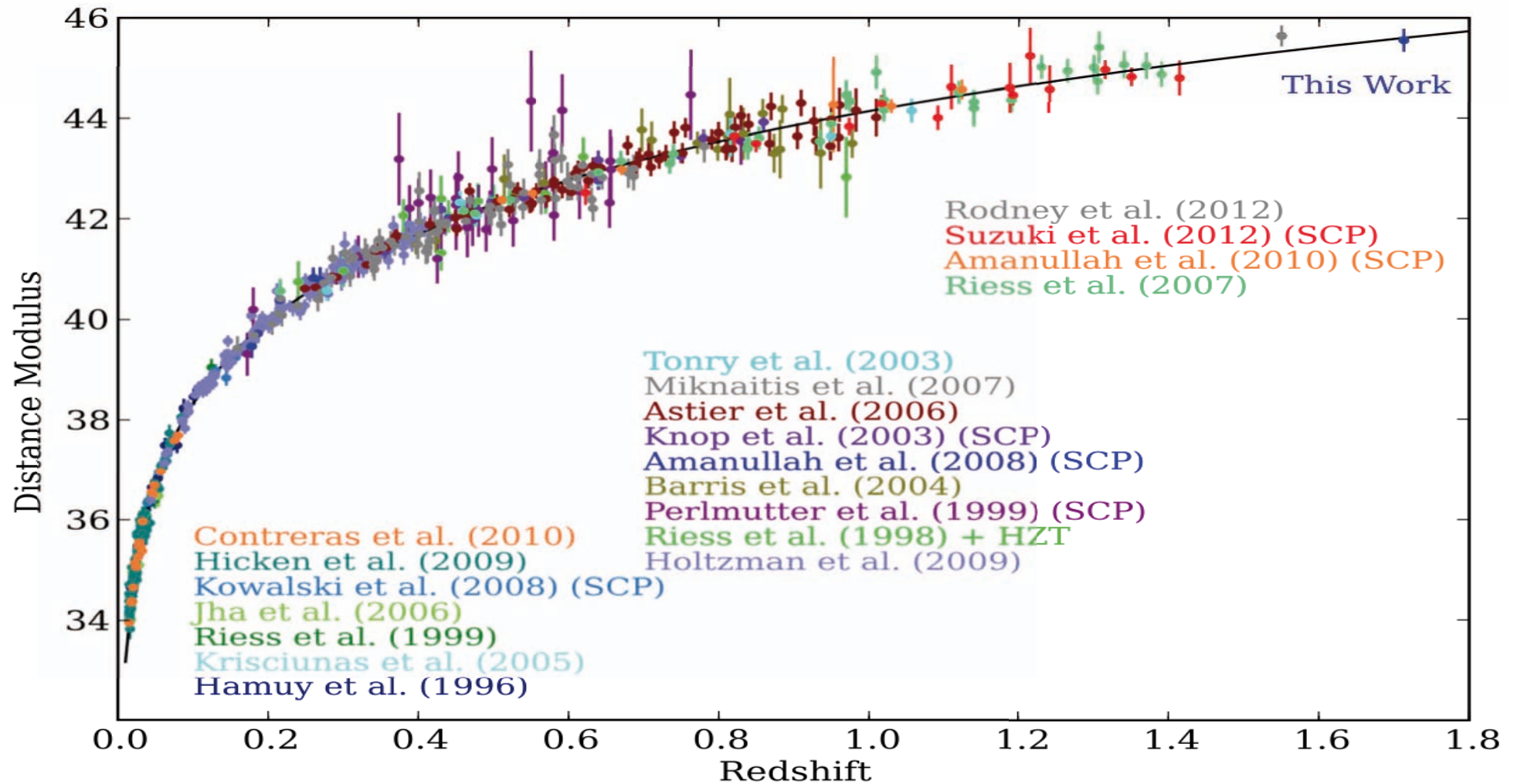
# *Distance de propagation de la lumière $d_{LT}$*



# La luminosité des supernovae lointaines



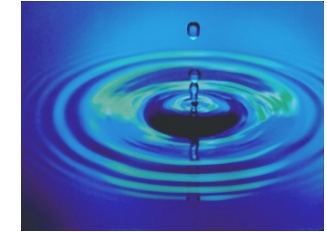
# La luminosité des supernovae lointaines



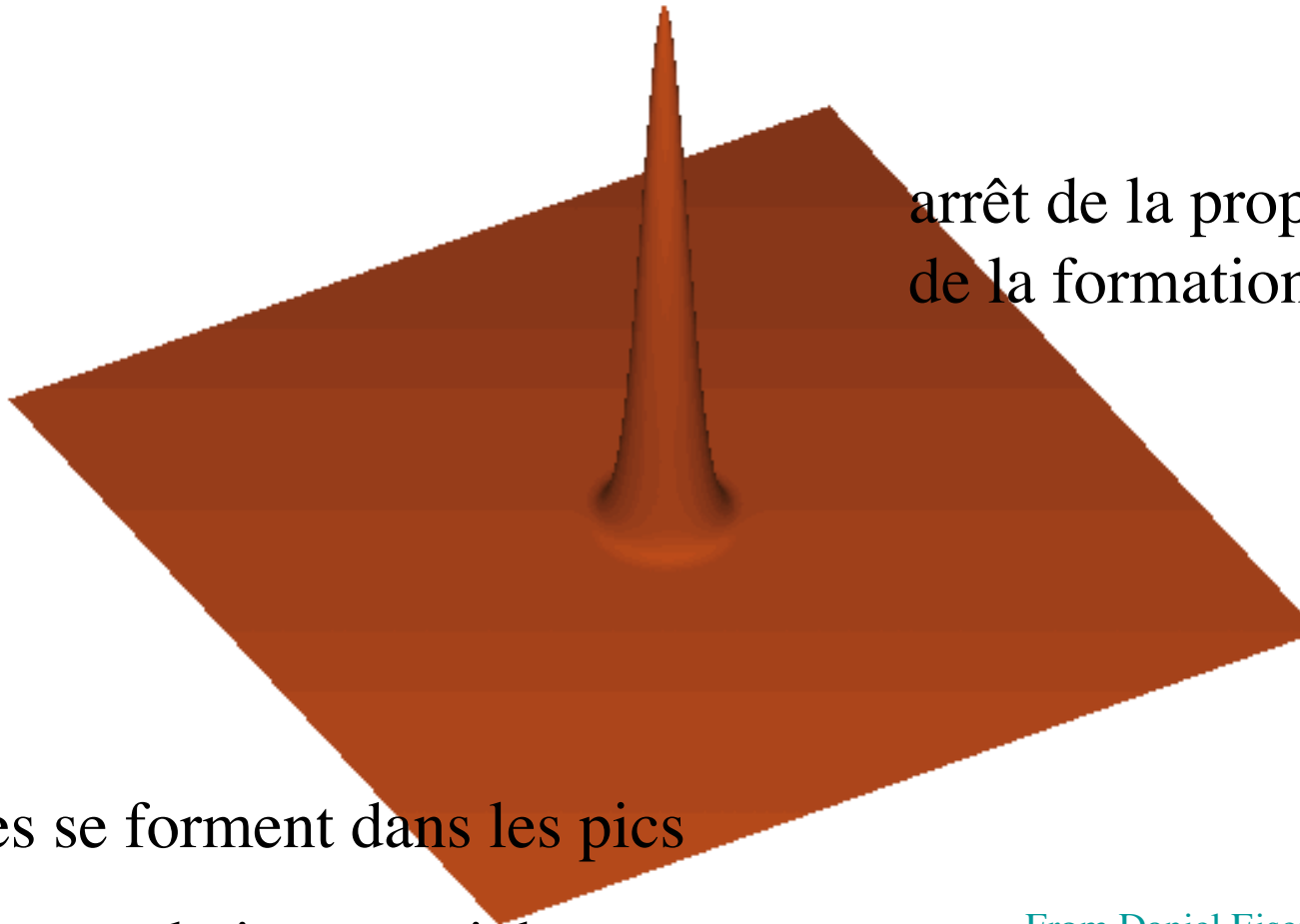
# BAO : Oscillations Acoustiques Baryoniques

- Empreintes laissées par les oscillations du fluide baryons-photons (plasma) dans la distribution de la matière ordinaire après formation des structures
- La modulation de la distribution de matière baryonique suit essentiellement celle de la matière sombre, dans des structures formées par croissance des fluctuations de densité et effondrement gravitationnel
- Sonde cosmologique de type règle standard ( $D_A$ )
  - avec une mesure déjà faite @  $z \sim 1100$  en prime (anisotropies du fond micro-ondes)
- Étudiée par des traceurs de matière baryonique: galaxies (SDSS, LSST) ou  $H_I$  (radio@21cm) avec biais différents

# Vue 3D



arrêt de la propagation lors  
de la formation des atomes  
 $R \sim 150 \text{ Mpc}$

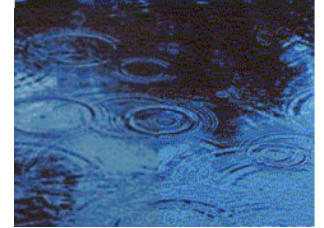


Les galaxies se forment dans les pics

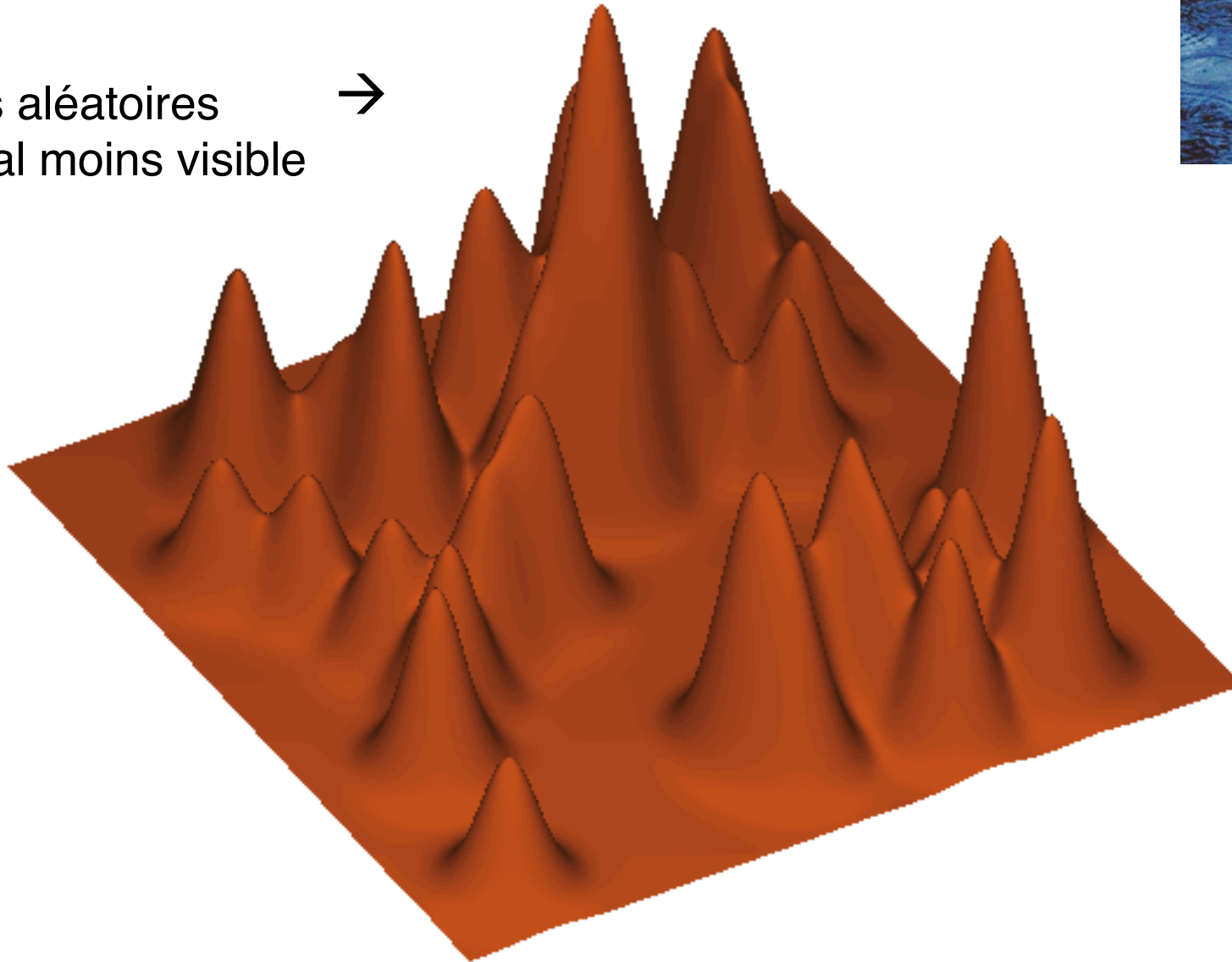
→ excès de corrélations spatiales

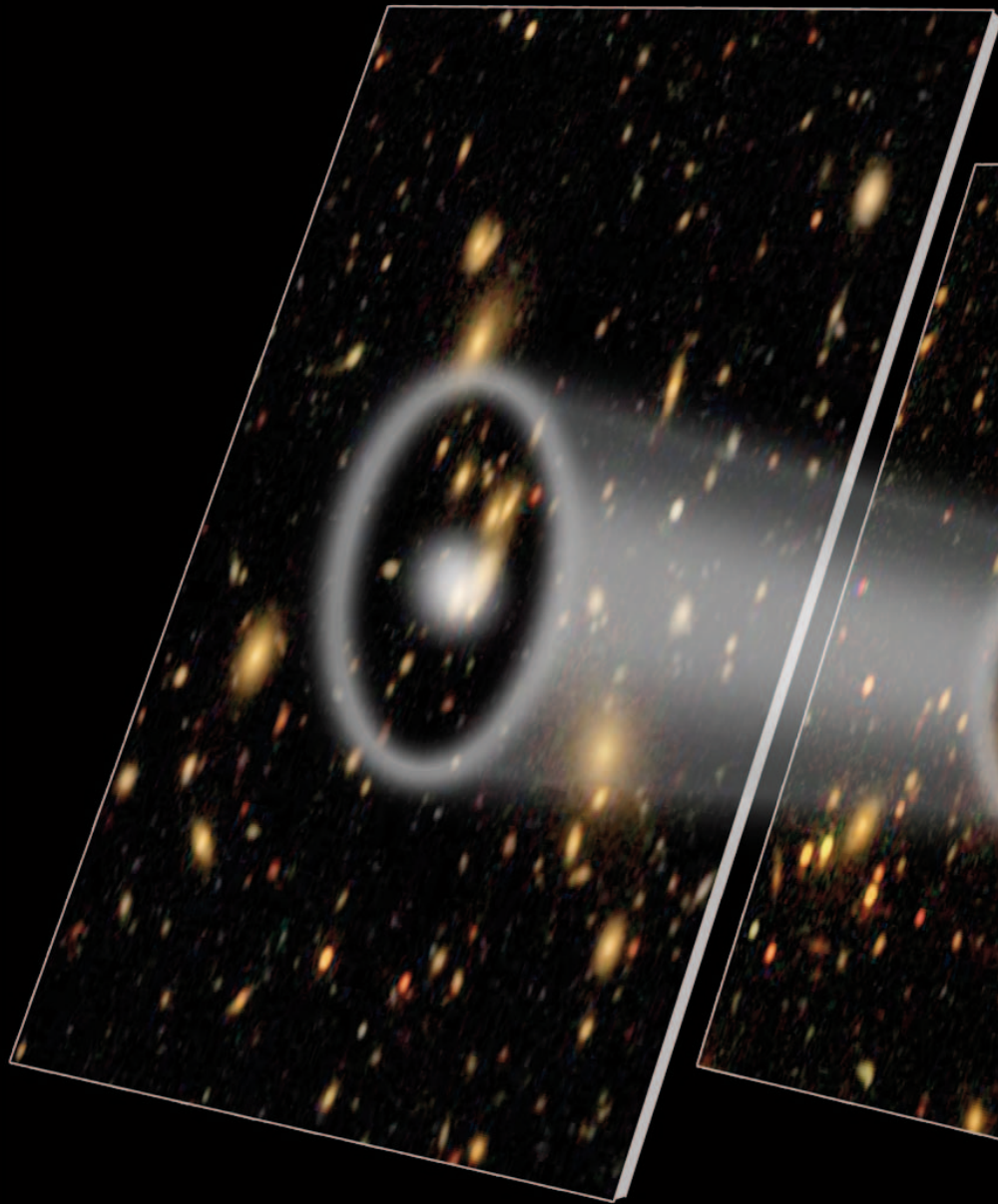
From Daniel Eisenstein

# Perturbations aléatoires

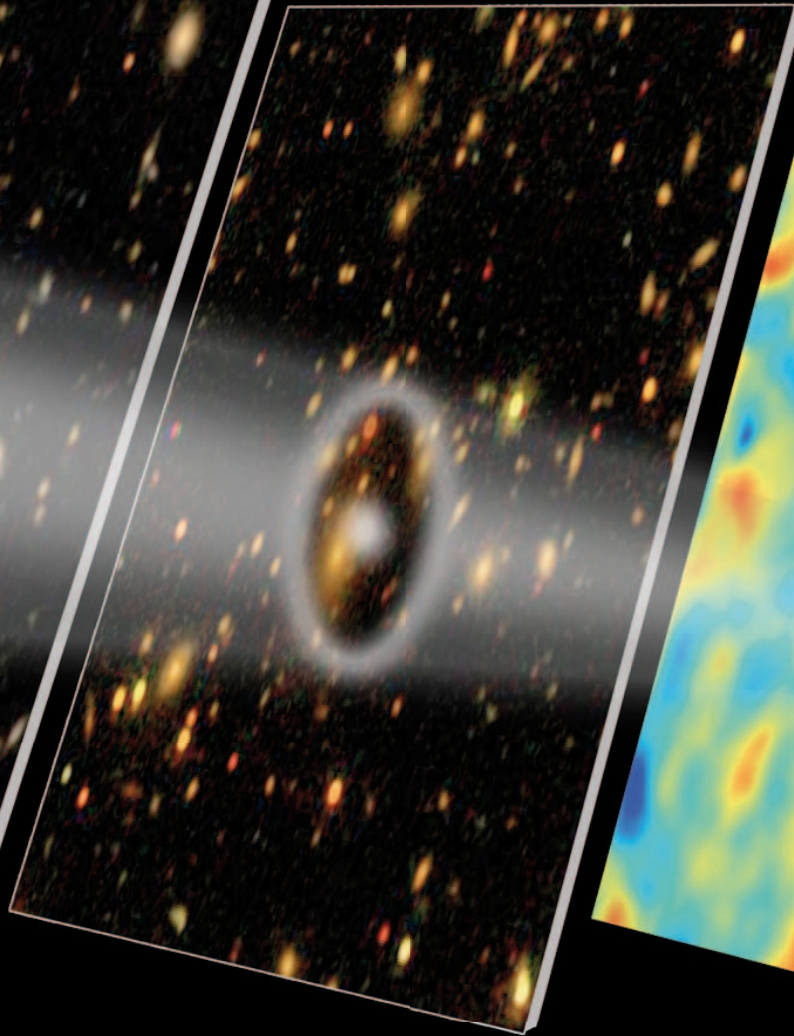


Phases aléatoires  
-> signal moins visible

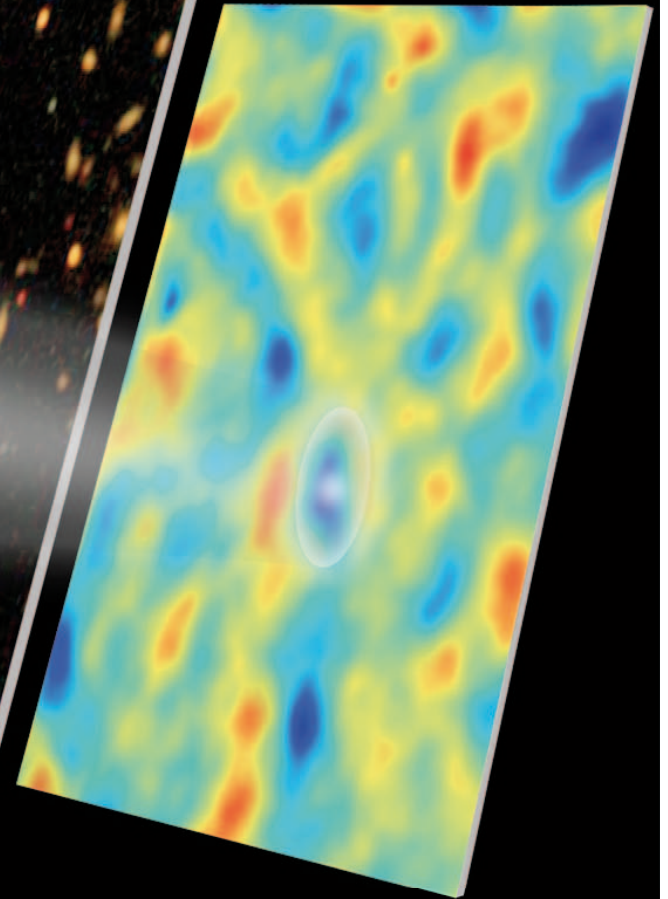




Galaxy map 3.8 billion years ago



Galaxy map 5.5 billion years ago



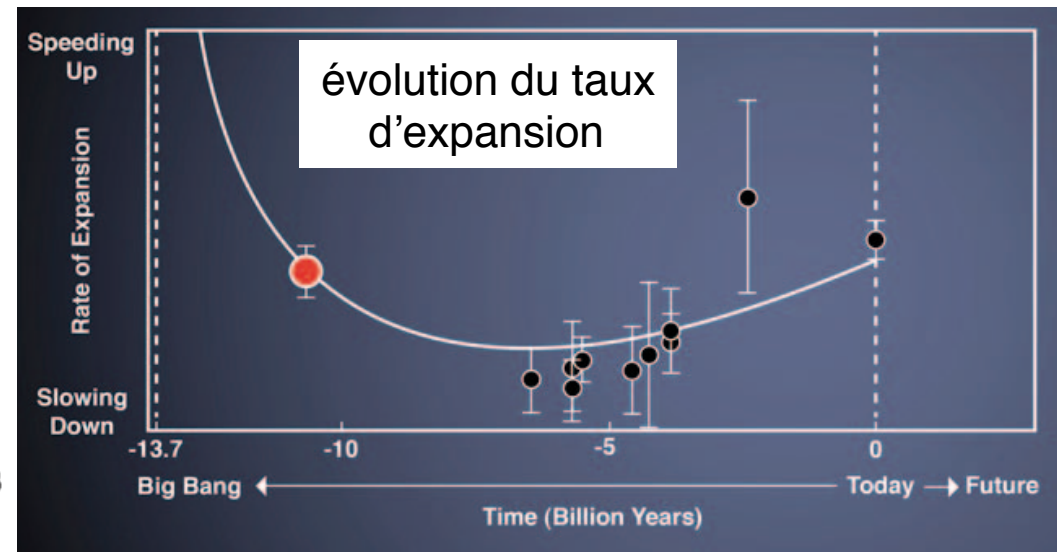
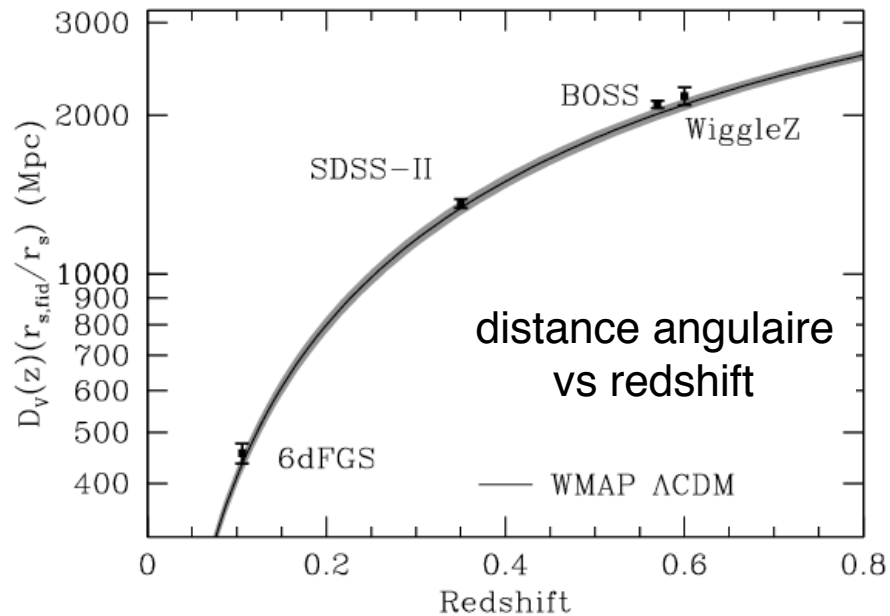
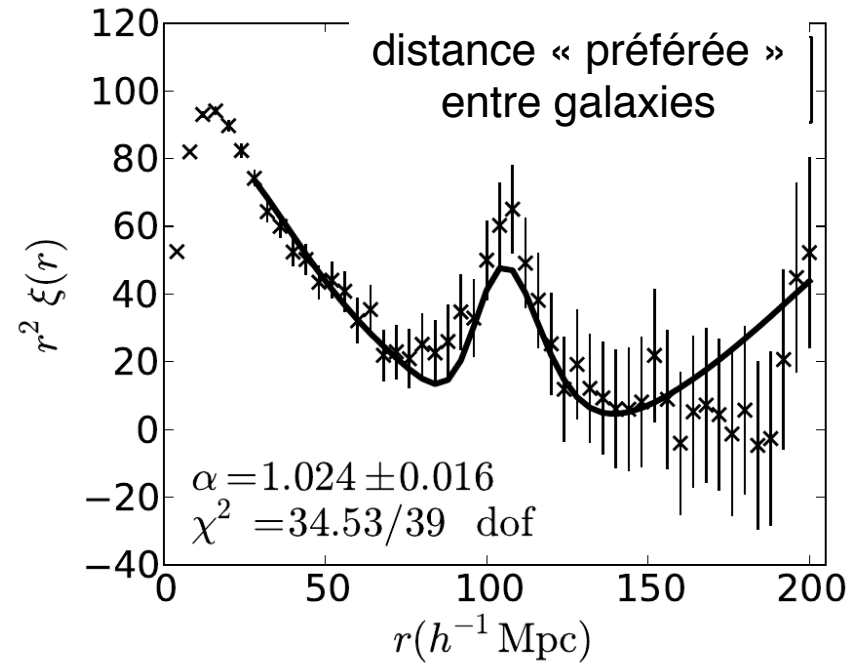
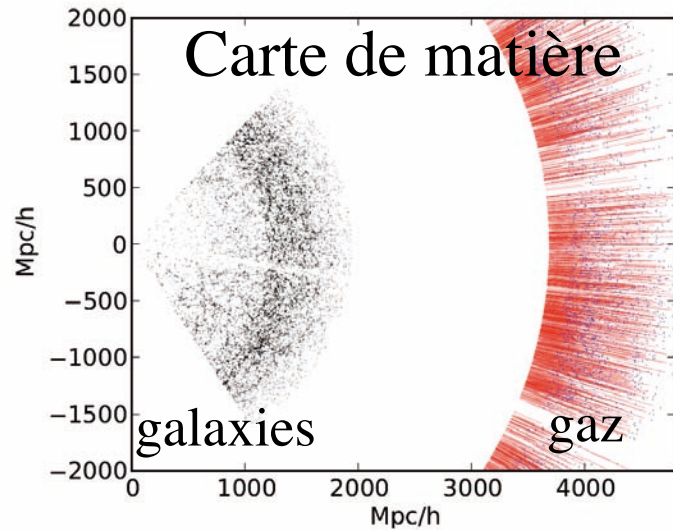
CMB 13.7 billion years ago

**Mesure de l'échelle des BAO**  
**-> à l'aide des grands relevés**  
**comme SDSS (+ tard LSST)**



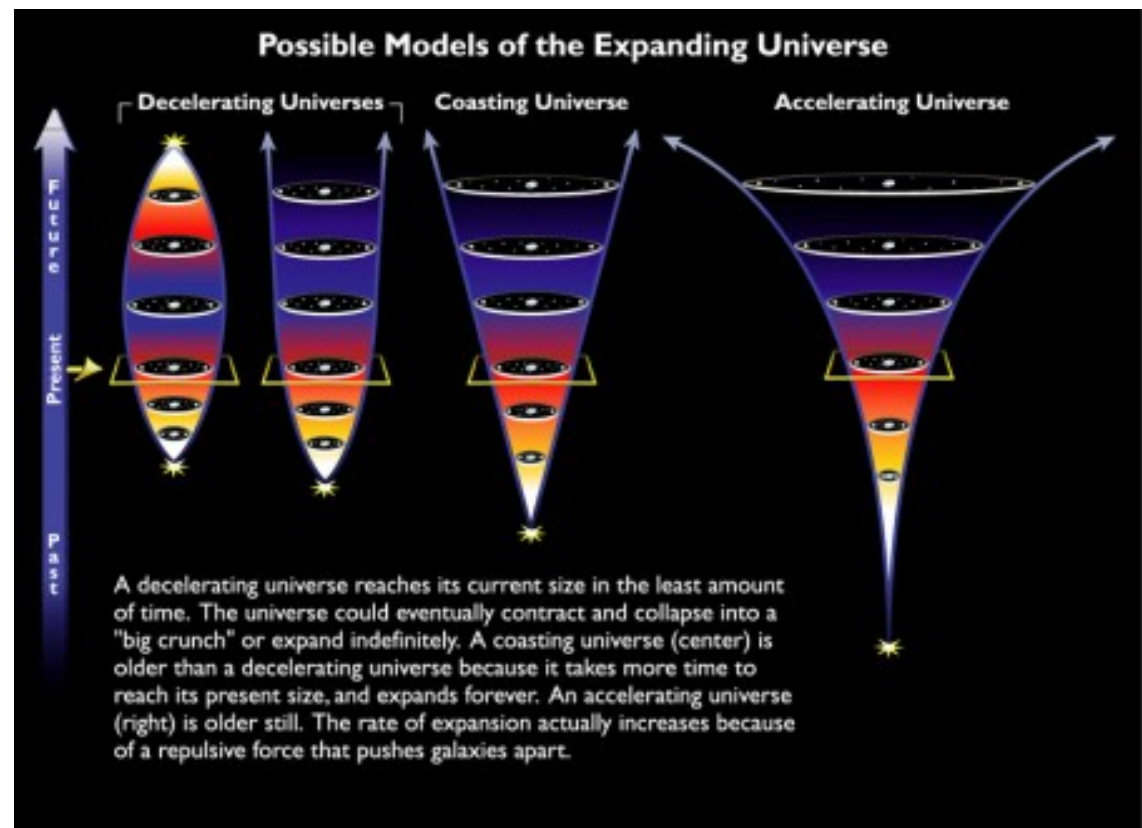


# Longueur des rides: règle standard



# Il semble que l'expansion soit dans une phase d'accélération -> hypothèse de l'énergie noire

- **Un fluide qui exerce une pression négative**
  - La compression du vide diminue le bilan énergétique et donc le bilan gravitationnel; de là résulte une sorte de gravité répulsive.
- **Elle est à l'origine de l'accélération de l'expansion**
- Nous vivons (comme par hasard) à une époque où sa densité est du même ordre de grandeur que la densité de matière



# La constante cosmologique

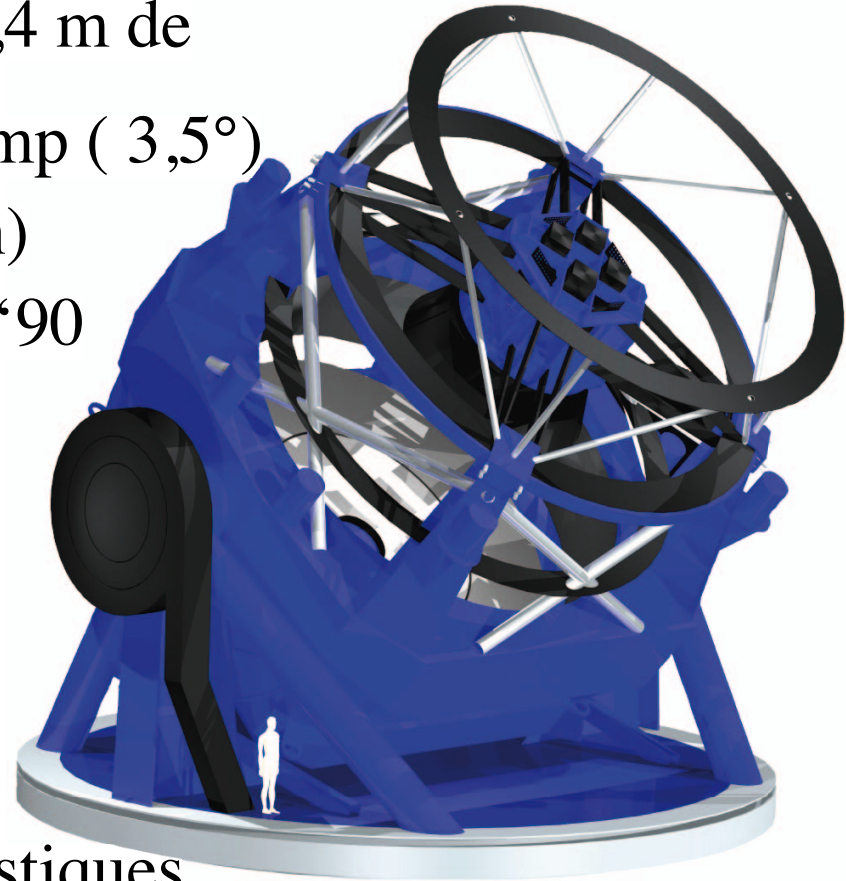
- Einstein l'a introduite pour permettre un Univers statique. Un moyen d'éviter sinon l'inévitable contraction gravitationnelle.
- Elle perd de son intérêt après la découverte de l'expansion.
- Et réapparaît en 1998
- Chaque  $\text{m}^3$  de vide en contiendrait 63 nanoJoule
- Ne serait dominante que dans des régions ultra-vides (sortir de la Galaxie)

# Il y a encore beaucoup à faire en cosmologie

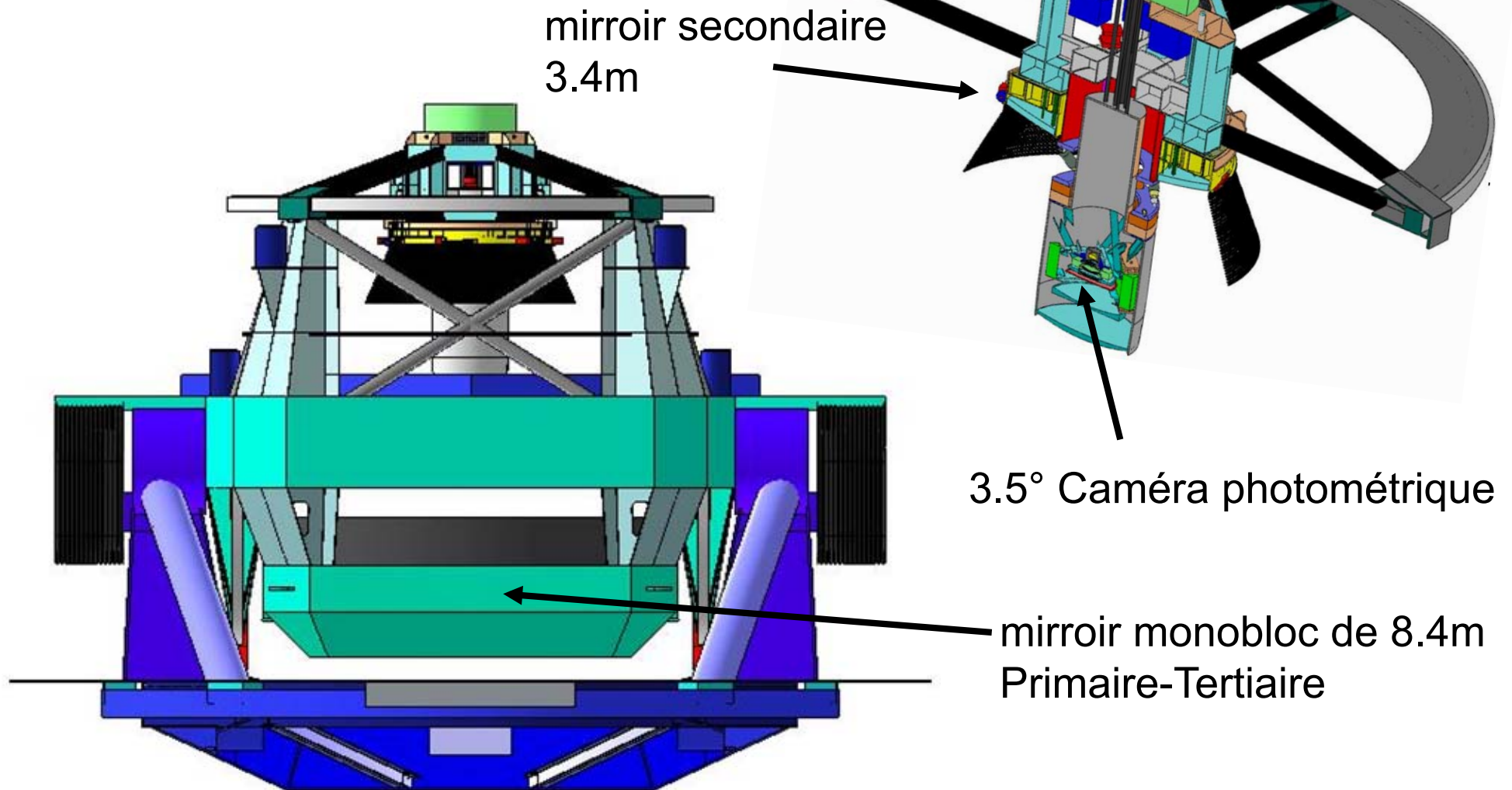
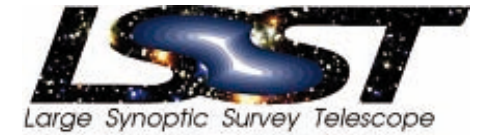
- Comprendre ce qu'est la matière cachée
- Etablir l'équation d'état de l'énergie noire
- Bases théoriques
- Mais aussi
  - Pourquoi la matière l'a-t-elle emporté sur l'antimatière?
- Avec des instruments de plus en plus grands

# LSST : Large Synoptic Survey Telescope

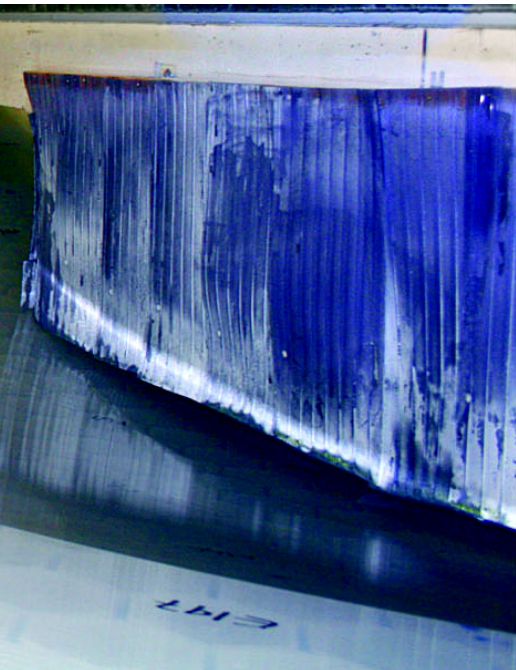
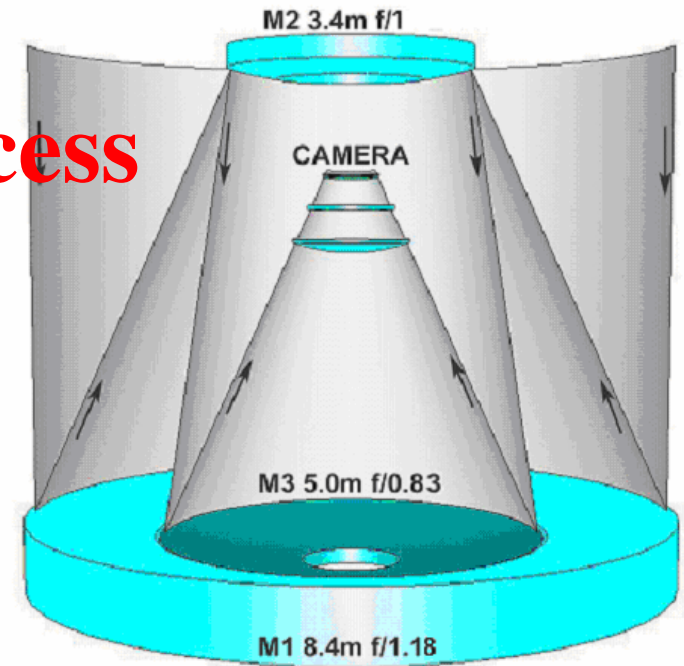
- Télescope optique de 8,4 m de diamètre avec caméra grand champ (  $3,5^\circ$  )
- Au Chili (Cerro Pachon)
- imaginé fin des années '90
- Caméra de 3.2 Gpixels
- Lecture 2s
- 6 filtres ugrizy
- WL jusqu'à  $z \sim 3$
- SNIa jusqu'à  $z \sim 1$
- BAO: oscillations acoustiques
- Galaxies et amas de galaxies
- Phénomènes transitoires



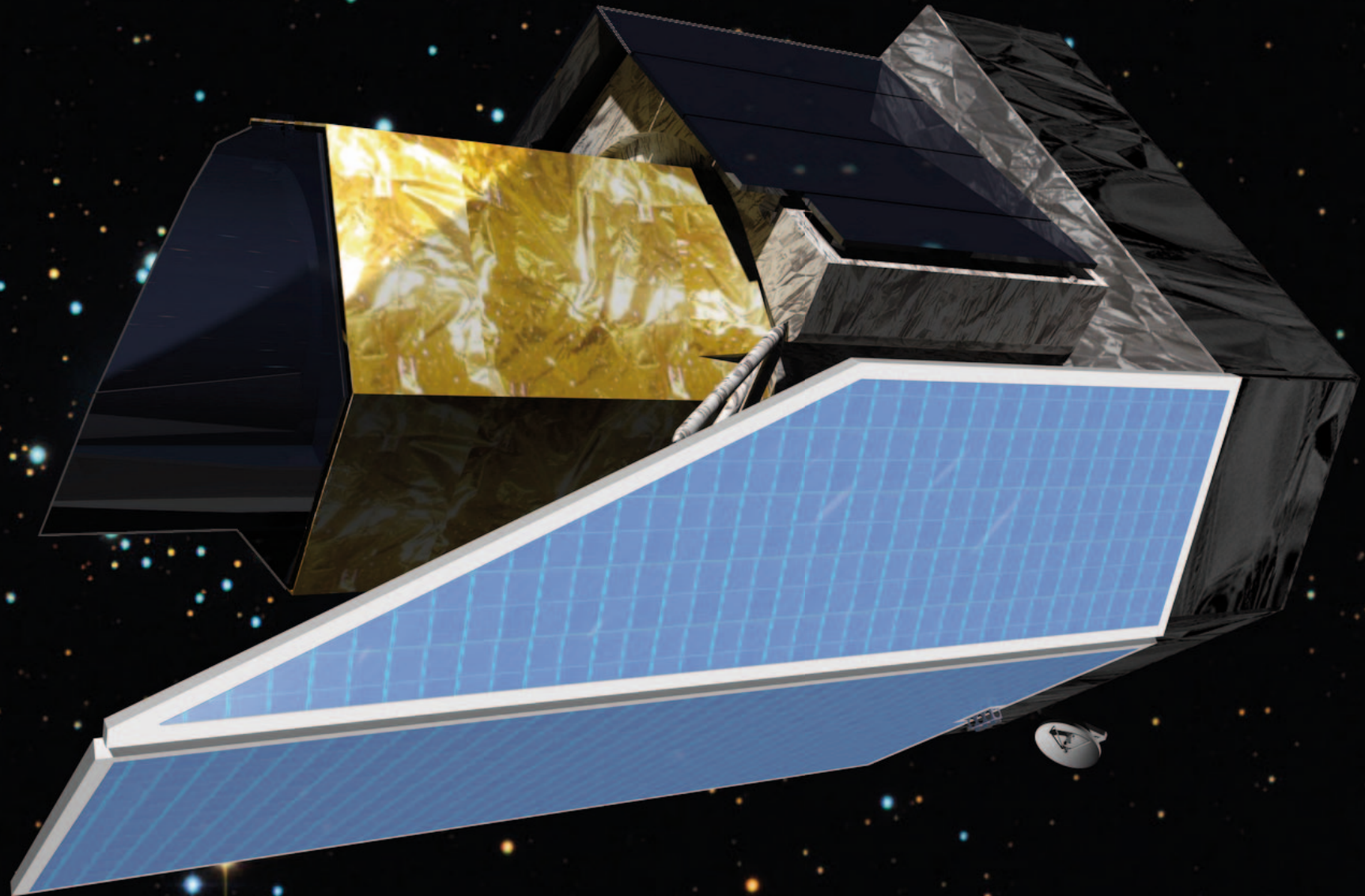
# Large Synoptic Survey Telescope



# M1M3 Fabrication in Process



# Le projet spatial EUCLID







**S**  
**K**  
**A**



**Square kilometer array**

# Quelques références (pour physiciens non spécialistes)

A télécharger à partir des Images de la Physique sur le site:

**<http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/>**

**La constante cosmologique:** F. Bernardeau. *Images de la Physique* 2009

**Supernovae et énergie noire:** N. Regnault. *Images de la Physique* 2008

**La nucléosynthèse primordiale:** A. Coc et E. Vangioni. *Images de la Physique* 2008

**Le rayonnement de fond cosmologique; Archeops:** F.-X. Désert. *Images de la Physique* 2008