

# **ASTROPHYSIQUE**

## **20 – LE CÔTÉ OBSCUR DE L'UNIVERS**



Alain Bouquet

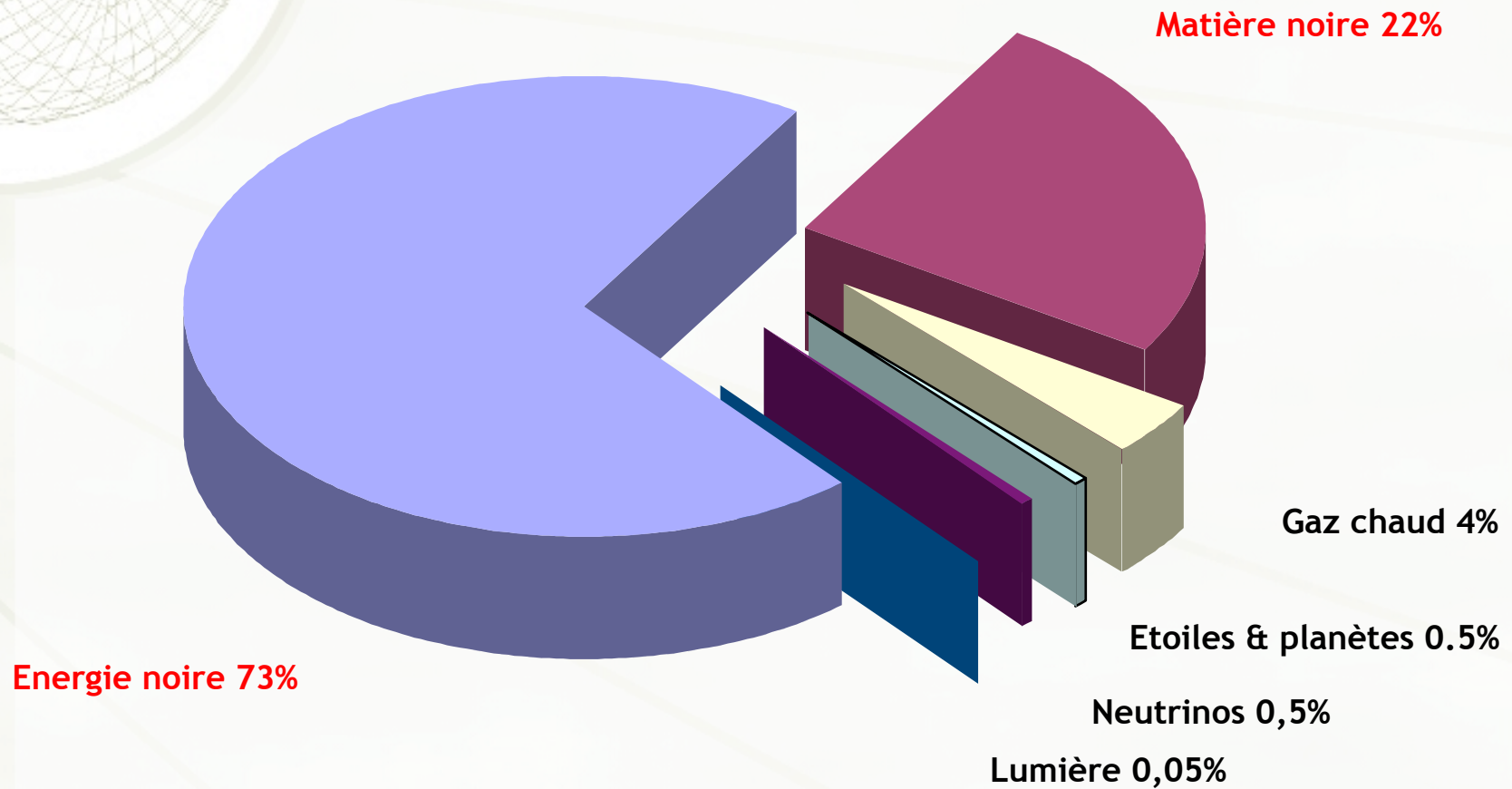
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie  
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





## LA QUESTION, EN UN DESSIN

- Une composition de l'univers inattendue (par les théoriciens en tout cas)



## RAPPEL : LES OMÉGAS

- De l'équation de Friedmann-Lemaître

$$H^2 = \left[ \frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{\text{matière}} + \rho_{\text{rayonnement}}) - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

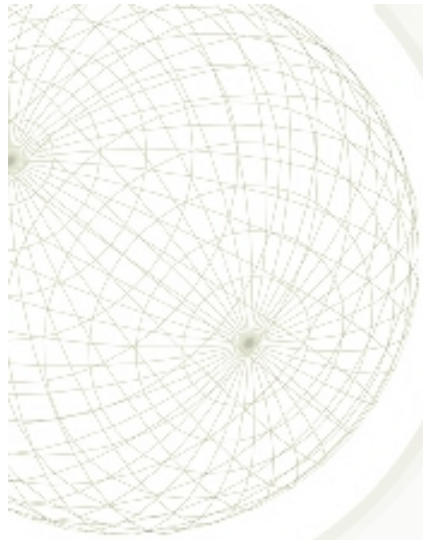
en divisant chaque côté par  $H^2$  on obtient :

$$1 = \Omega_{\text{matière}} + \Omega_{\text{rayonnement}} + \Omega_k + \Omega_\Lambda$$

en définissant les « Omégas » :

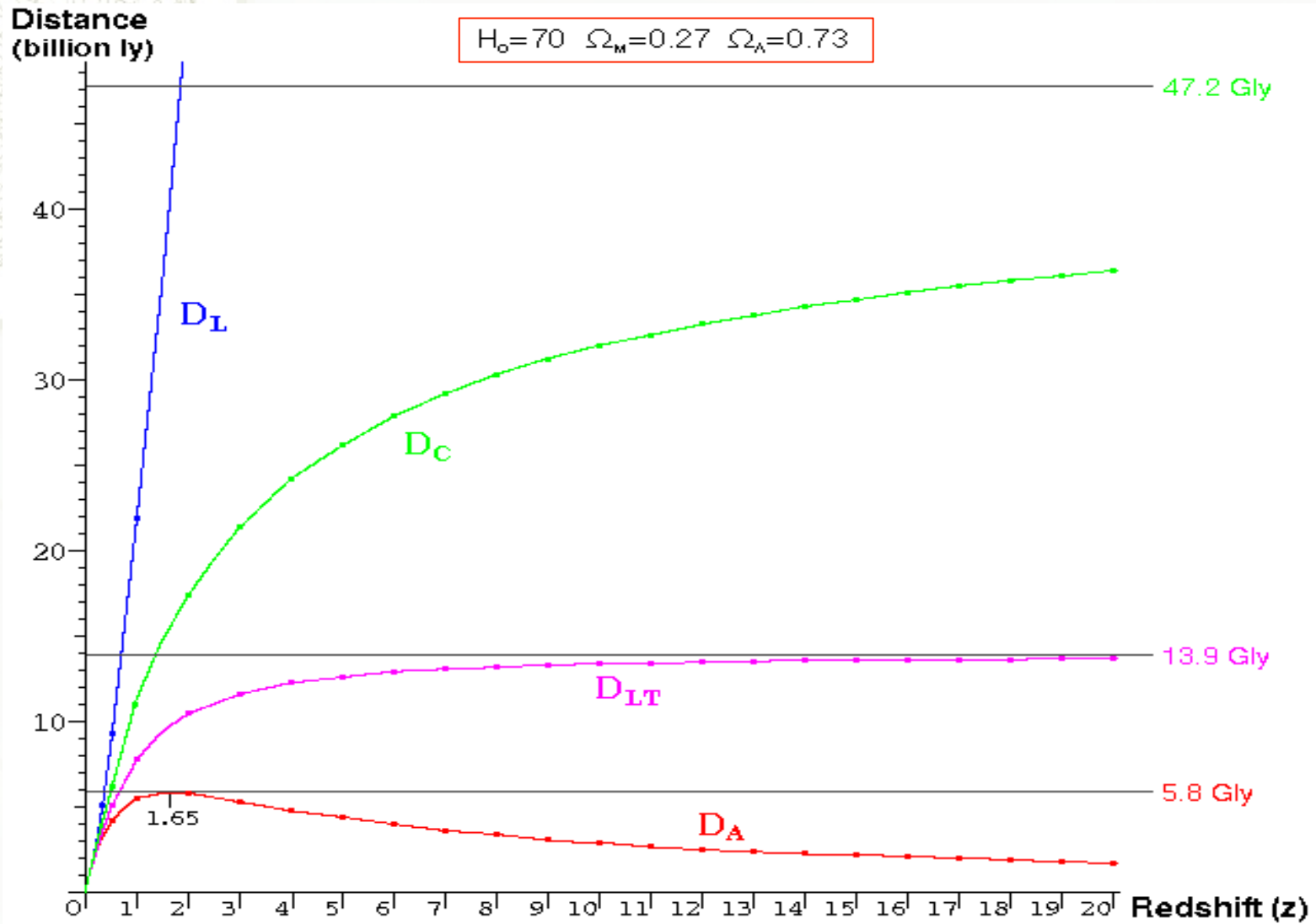
- $\Omega_{\text{matière}} = 8\pi G \rho_{\text{matière}} / 3H^2$  Observations :  $\Omega_m \sim 0,27$
- $\Omega_{\text{rayonnement}} = 8\pi G \rho_{\text{rayonnement}} / 3H^2$   $\Omega_r \ll 1$
- $\Omega_k = -k / a^2 H^2$   $\Omega_k \ll 1$
- $\Omega_\Lambda = \Lambda / 3H^2$   $\Omega_\Lambda \sim 0,73$





# **DISTANCES**

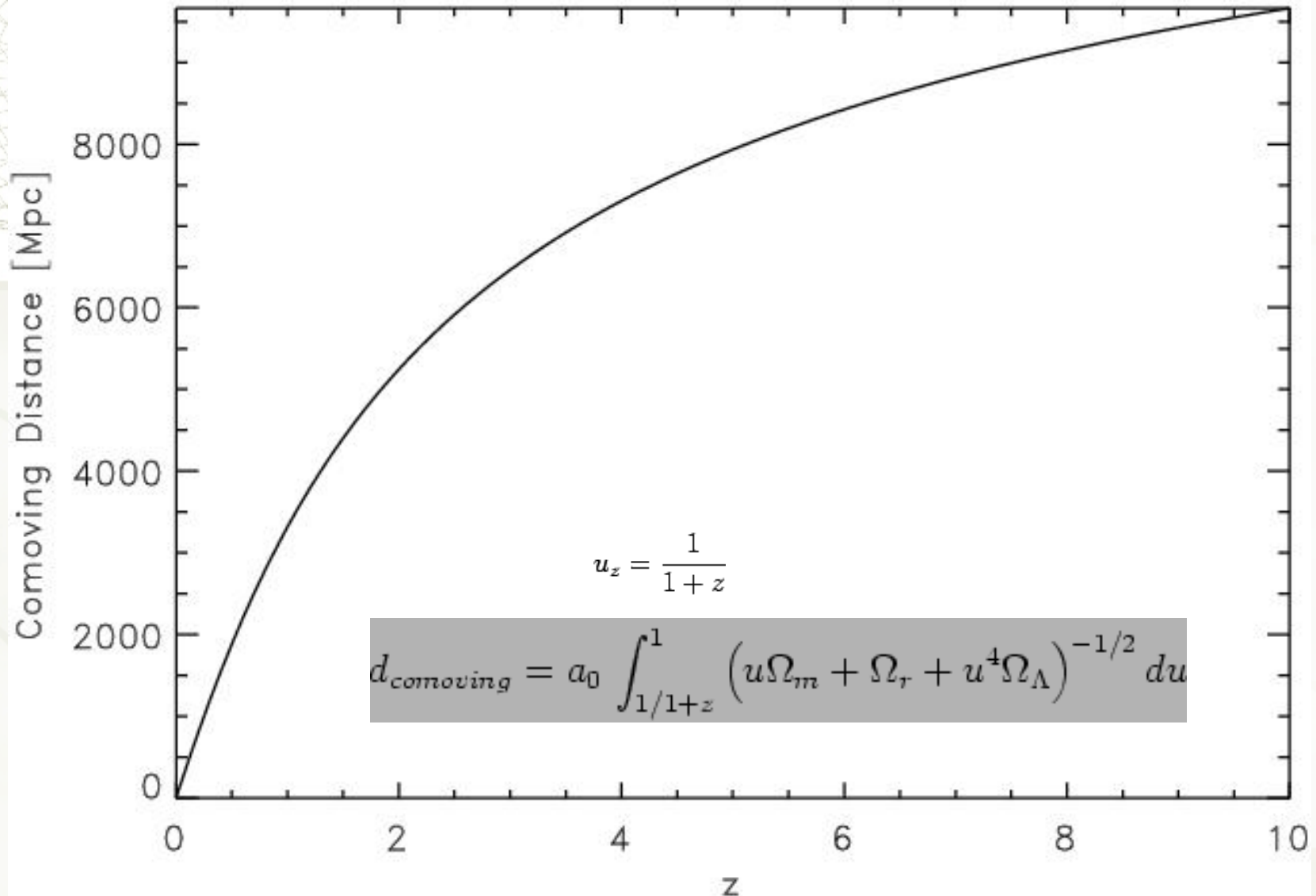
# LES DISTANCES COSMOLOGIQUES



## DISTANCE, MAIS QUELLE DISTANCE ?

- Il est possible de définir de différentes façons — **non équivalentes** — une notion de distance en cosmologie
- Distance propre
  - distance parcourue par un photon d'un point à l'autre, d'intérêt très limité en cosmologie
- Distance comobile
  - $D_{\text{comobile}} = a(t) \Delta\chi$
  - c'est la distance, à l'instant  $t$ , de 2 objets « immobiles » (de coordonnées comobiles  $\chi_1$  et  $\chi_2$  constantes)
  - inconvénient 1 : la distance comobile n'est pas directement mesurable
  - inconvénient 2 : elle dépend des paramètres cosmologiques [ $H_0$  et  $\Omega_i$ ] et de leur évolution avec  $z$ , qui permet de calculer  $a(t)$

## DISTANCE COMOBILE





## DISTANCE DE LUMINOSITÉ

- Dans un univers euclidien, la luminosité apparente d'une source diminue comme le carré de sa distance
- $\Rightarrow$  on définit la « distance de luminosité »  $D_{lum}$  par

$$l = \frac{L}{4\pi D_{lum}^2}$$

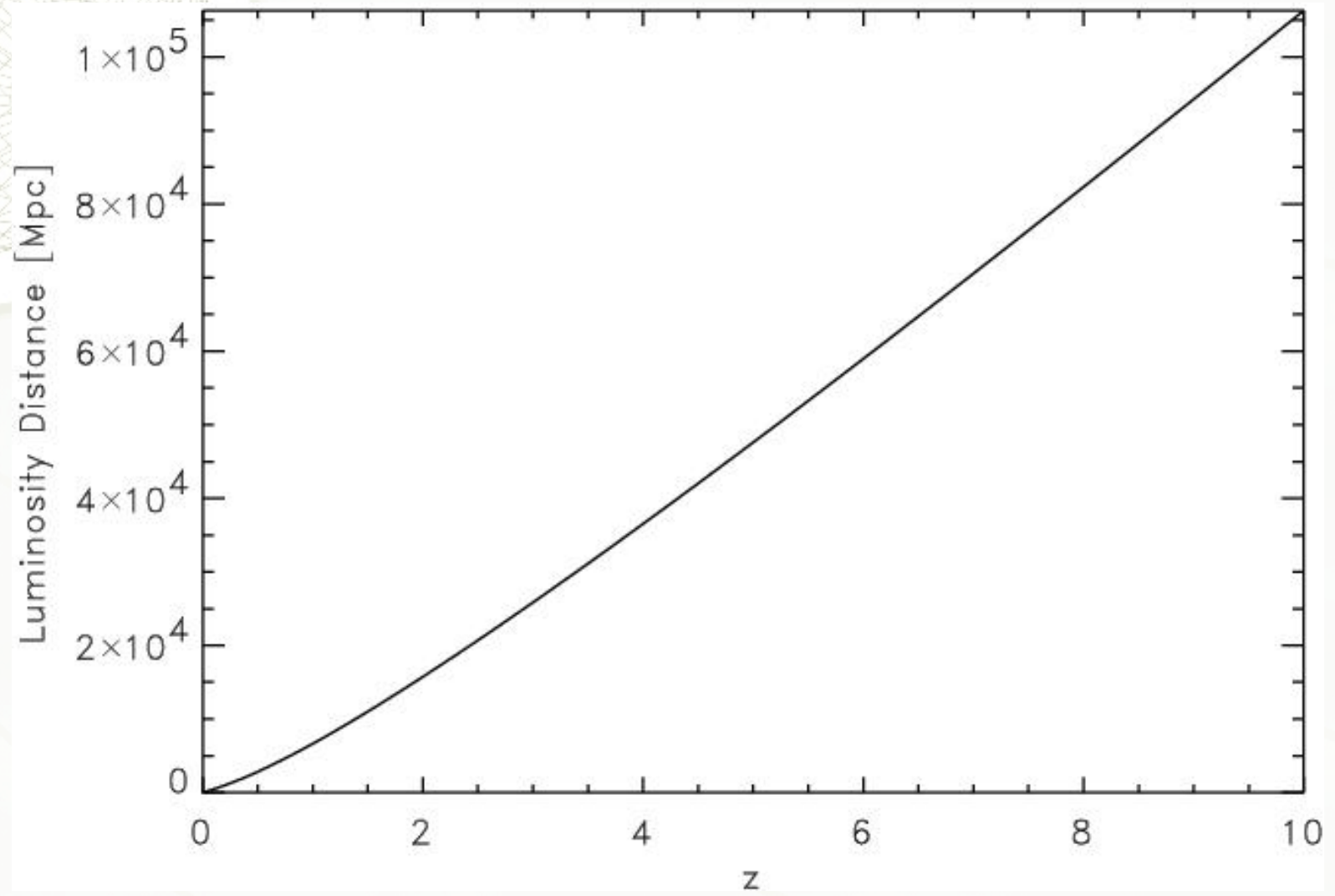
où  $L$  est la luminosité absolue de la source  
et  $l$  sa luminosité apparente

- Les photons émis au temps  $t_1$  arrivent au temps  $t_0$  sur une sphère de rayon  $a(t_0) \chi$  avec
  - un décalage vers le rouge  $a(t_0)/a(t_1)$
  - un ralentissement temporel  $a(t_0)/a(t_1)$

$$l = \frac{L}{4\pi a^2(t_0) \chi^2} \left( \frac{a(t_1)}{a(t_0)} \right)^2$$

$$D_{lum} = a^2(t_0) \chi / a(t_1)$$

# DISTANCE DE LUMINOSITÉ

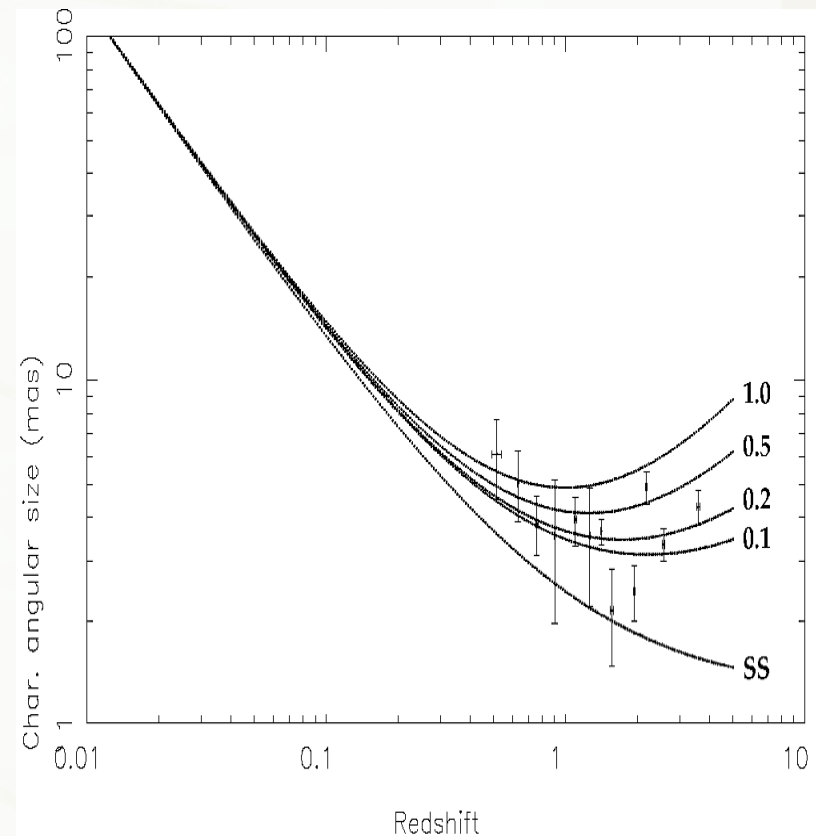


## DISTANCE ANGULAIRE

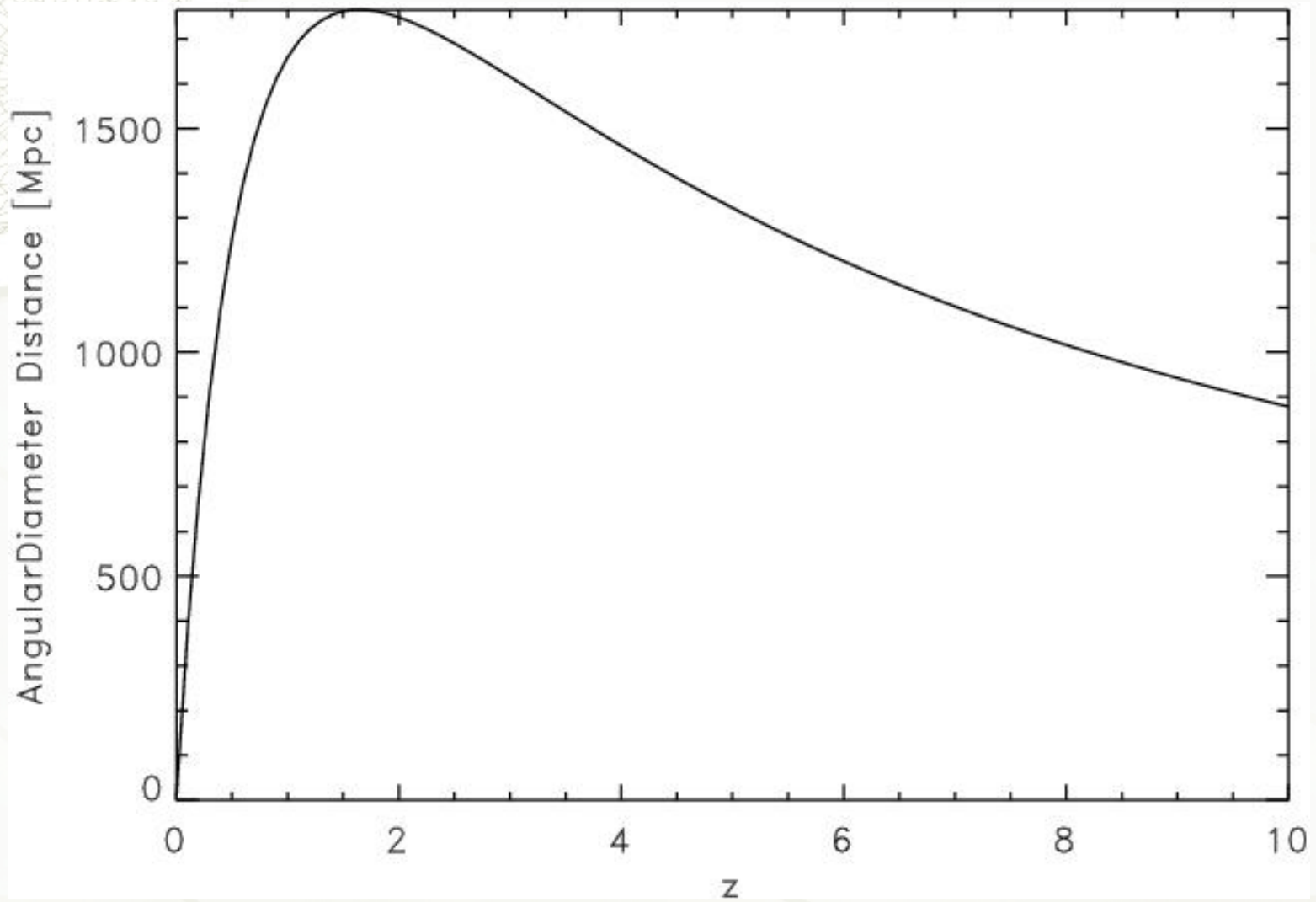
- Celle qu'utilisent les télémètres d'artillerie...
- Un objet de dimension physique  $L$  connue est vu sous l'angle  $\theta$
- sa distance  $D$  est simplement
- $D = L/[2\tan(\theta/2)] \sim L/\theta$
- si l'objet est une galaxie de diamètre  $L$  et vue comme elle était à l'instant  $t_1$ , la métrique RW donne :
- $L = a(t_1) S_k(\chi) \theta$
- $\Rightarrow$  sa « distance angulaire » est

$$D_{\text{angulaire}} = a(t_1) S_k(\chi)$$

- Pour des objets de plus en plus lointains,  $S_k(\chi)$  augmente mais  $a(t_1)$  diminue, et l'angle  $\theta$  passe par un minimum



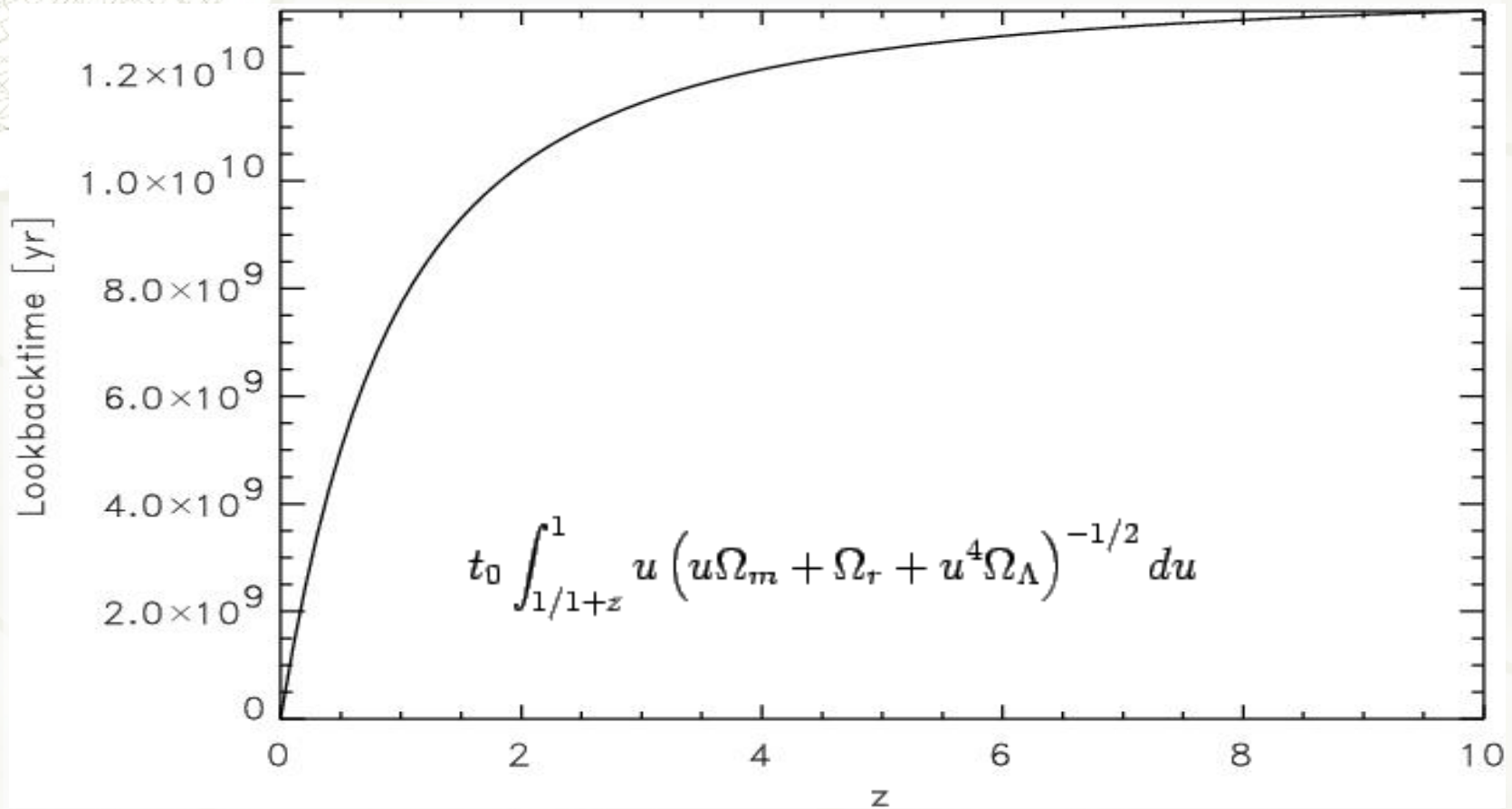
# DISTANCE ANGULAIRE



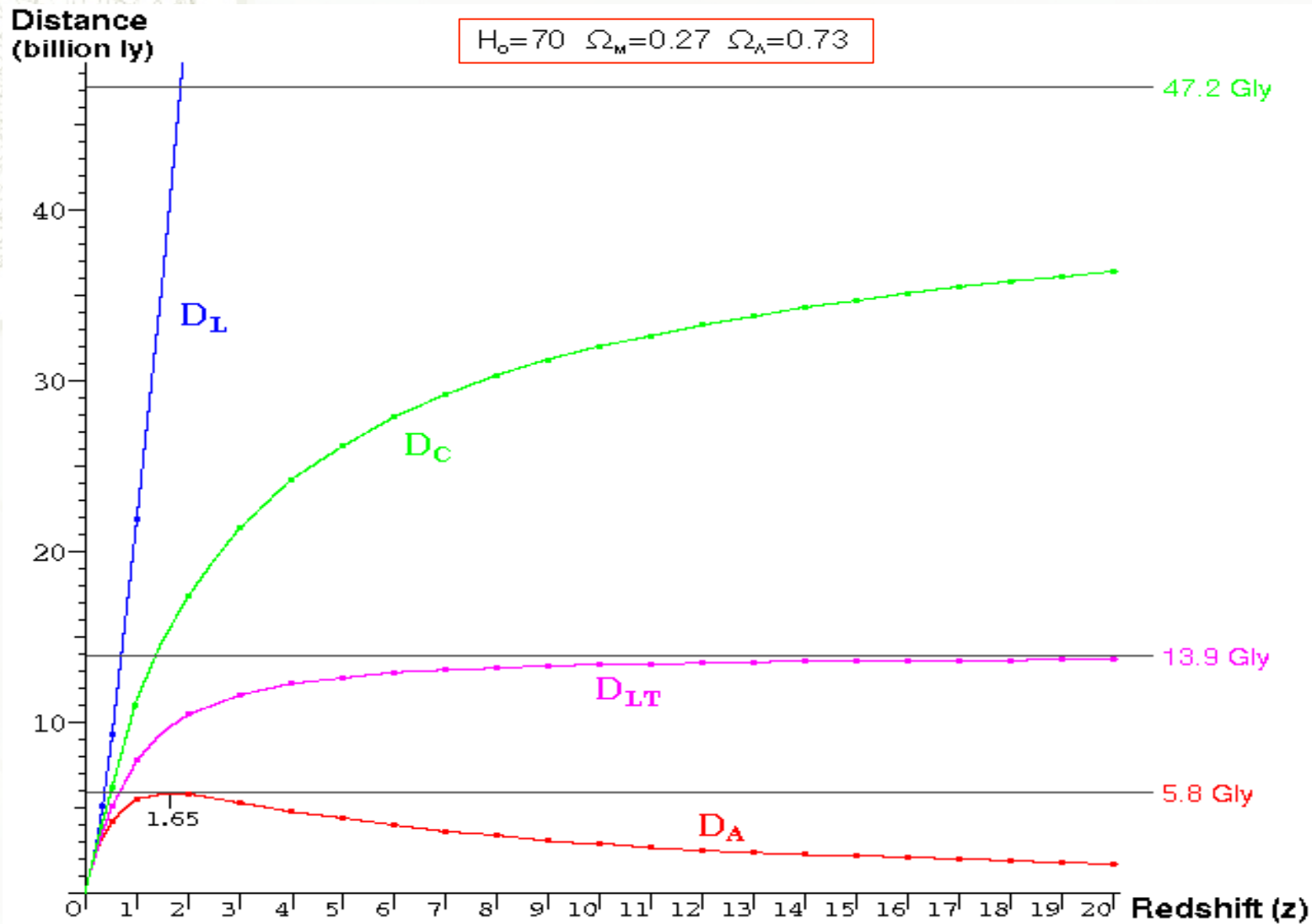


## TEMPS DE REGARD EN ARRIÈRE (LOOKBACK TIME)

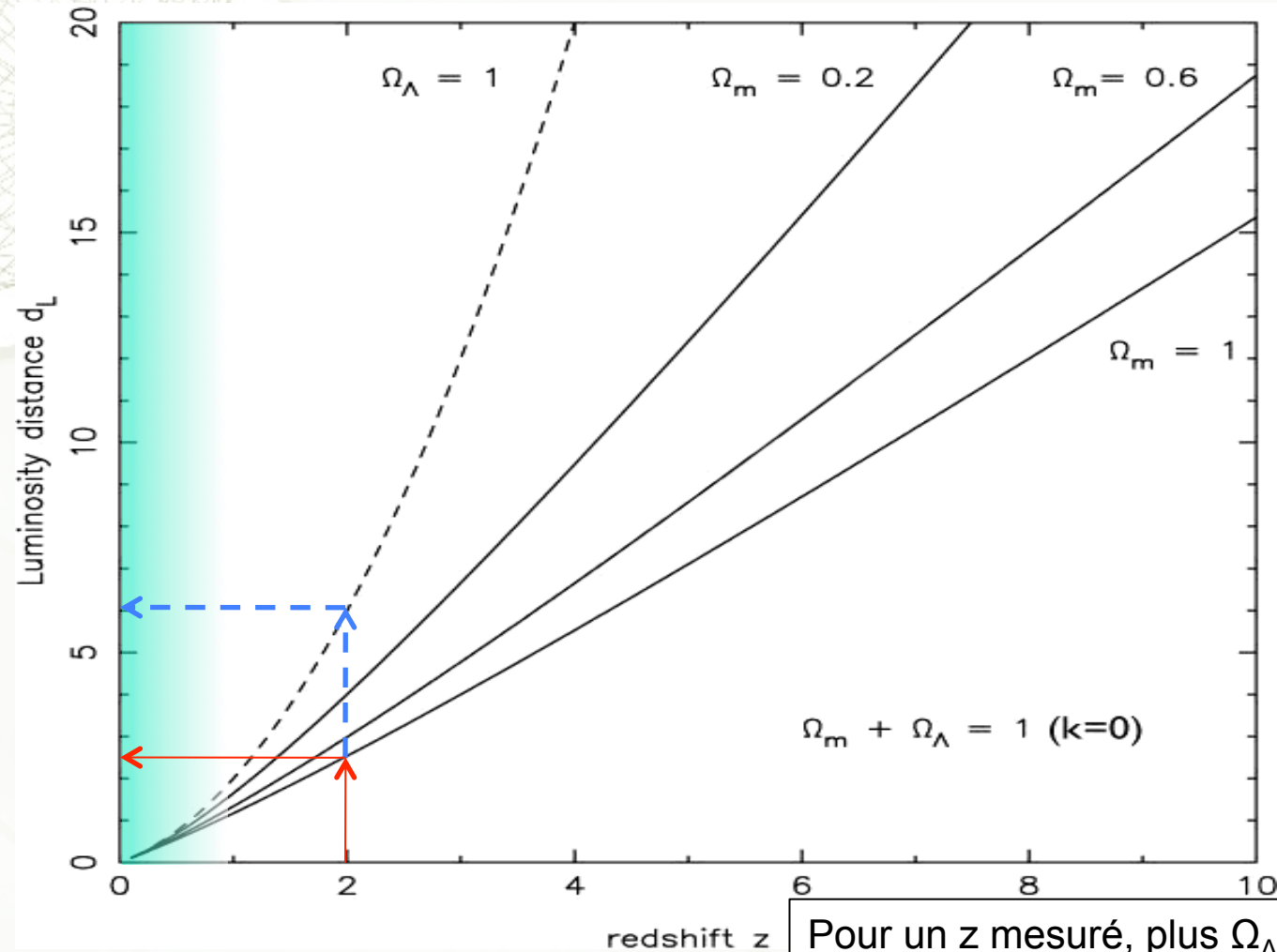
- La lumière a une vitesse finie: depuis combien de temps est partie une lumière dont le décalage vers le rouge est  $z$  ?



# LES DISTANCES COSMOLOGIQUES



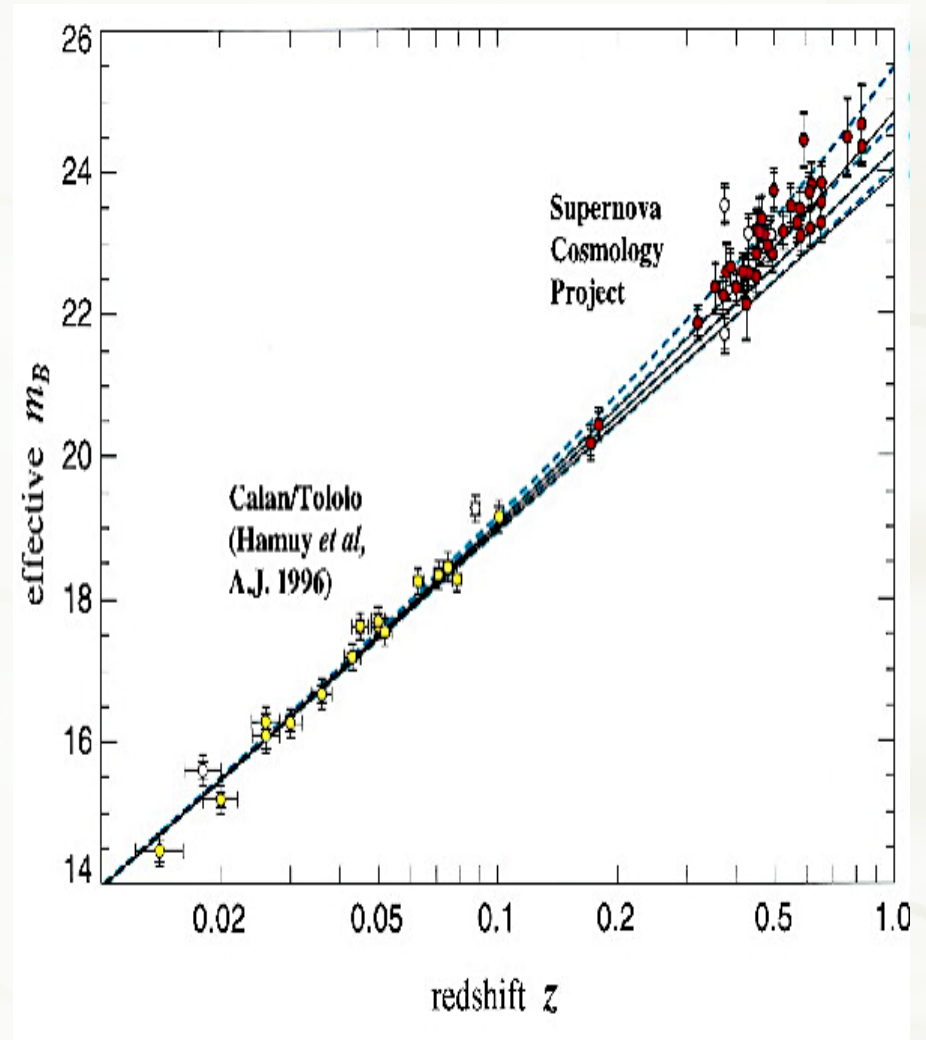
# LA RELATION DISTANCE-REDSHIFT DÉPEND DE $\Omega_{\text{MAT}}$ ET $\Omega_{\Lambda}$



Pour un  $z$  mesuré, plus  $\Omega_{\Lambda}$  est grand et  $\Omega_m$  petit, plus la distance de luminosité est grande → moins l'objet est lumineux

## EN PRATIQUE...

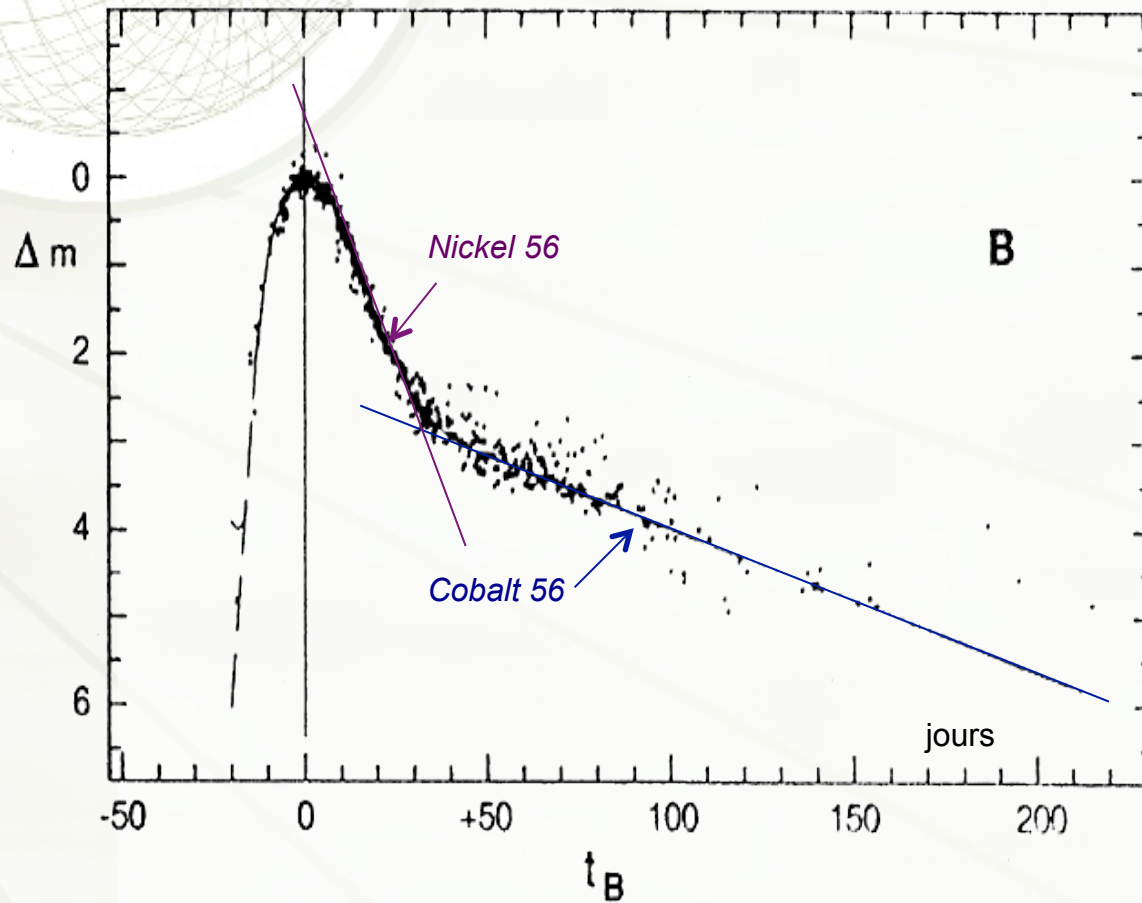
- On utilise rarement la distance propre, la distance comobile, la distance angulaire ou la distance de luminosité, qui dépendent trop des paramètres cosmologiques.
- On utilise le décalage vers le rouge  $z$  qui – lui – est *directement* mesuré !
- Par contre, la relation entre  $z$  et les différentes notions de distance sert à **tester** les modèles cosmologiques
  - exemple : la magnitude apparente ( $\Leftrightarrow$  distance de luminosité) des supernovae indique une accélération de l'expansion



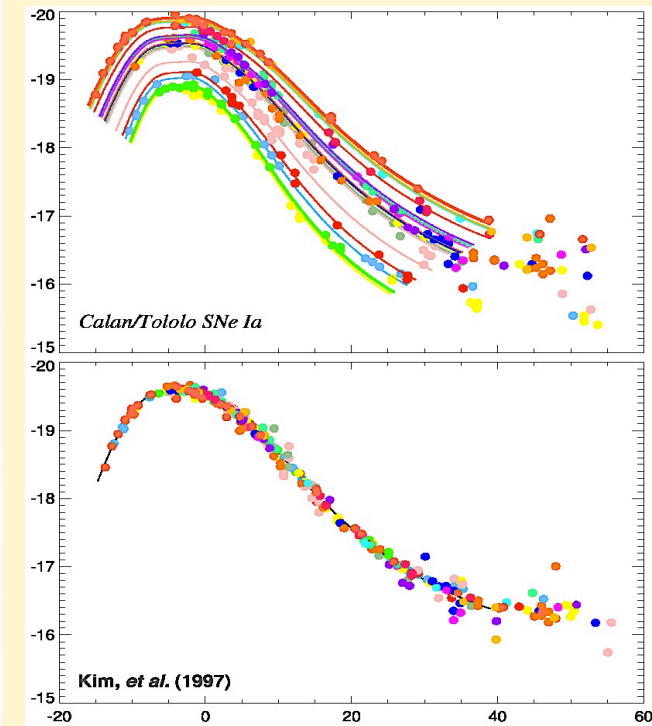


# SUPERNOVAE IA

- Explosion d'une naine blanche C-O atteignant la masse de Chandrasekhar  
→ « chandelle standard »

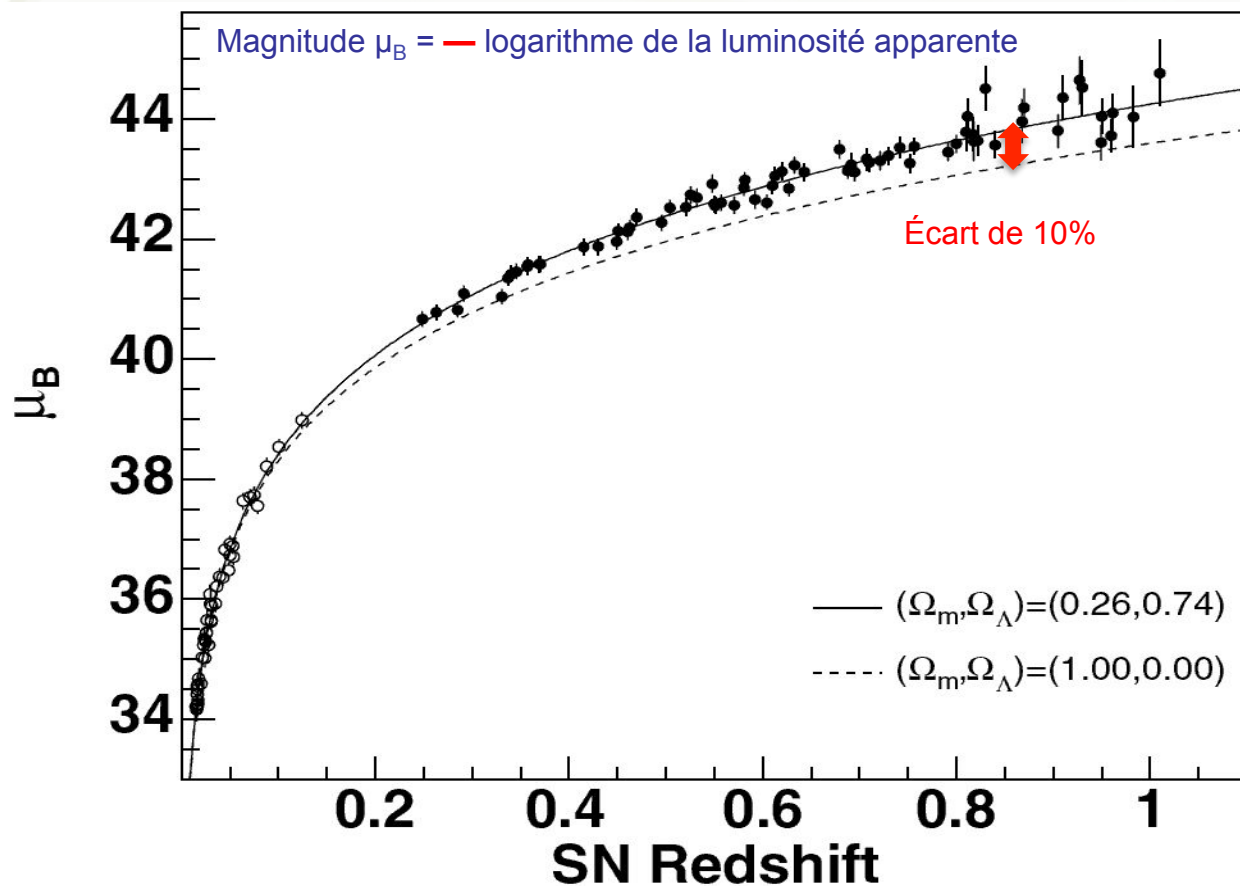


- Variations  $\sim 10\%$   
■ → corrigées via corrélation hauteur-largeur



## LES SUPERNOVAE SONT MOINS LUMINEUSES QUE PRÉVU

- ⇒ elles sont plus éloignées que prévu
- ⇒ l'expansion est plus rapide que prévu
- ⇒ **accélération !**





# **ÉNERGIE NOIRE** *OU* **CONSTANTE** **COSMOLOGIQUE ?**

# L'ÉQUATION D'EINSTEIN

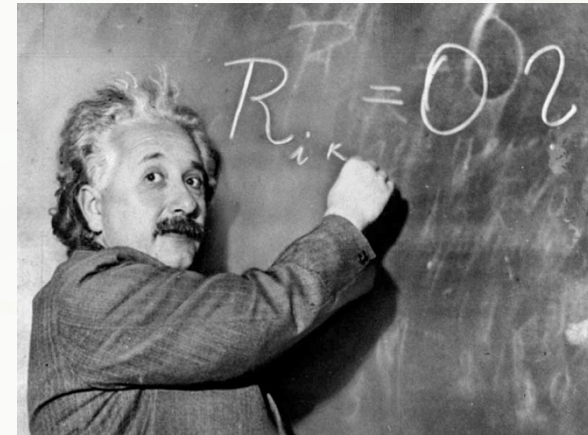
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (R - \Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Courbure de  
l'espace-temps

Distribution  
d'énergie

Constante  
cosmologique

Énergie  
du vide



- La constante cosmologique a comme unité l'inverse du carré d'une longueur
- Cette longueur est au moins de la taille d'une galaxie pour ne pas affecter Newton



# DU VIDE ET DU NÉANT

Le Tao est comme le vide éternel, empli d'infini possibilités.  
Il est caché mais toujours présent.

[Laozi, *Daodejing*]



- Matière et rayonnement  $\equiv$  **champs** ( $\equiv$  existant en tout point de l'espace)
- Particules  $\equiv$  **excitations** du champ matérialisées en certains points
  - *Champ électromagnétique*  $\rightarrow$  photons
  - *Champ électronique*  $\rightarrow$  électrons *etc.*
- Absence de particule  $\equiv$  **vide** *au sens quantique*
- Cet état du champ possède une énergie (énergie du vide)
  - Sans importance quand on observe des transitions entre deux états et donc uniquement des *variations* d'énergie
  - **Mais elle a des effets gravitationnels**
- Cette énergie du vide est normalement constante
  - sauf quand elle varie...
  - ce qui arrive dans certains modèles

# ÉNERGIE DU VIDE ?

- *Par définition*, énergie d'un état quantique sans particule ( $\equiv$  excitation du champ)
- $\Rightarrow$  Tenseur énergie impulsion de la forme

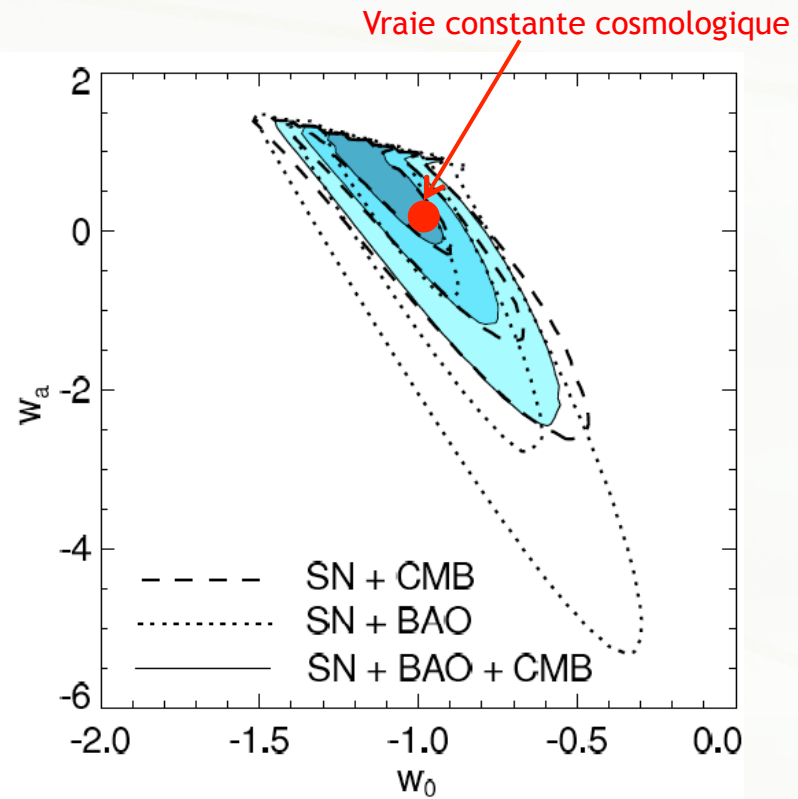
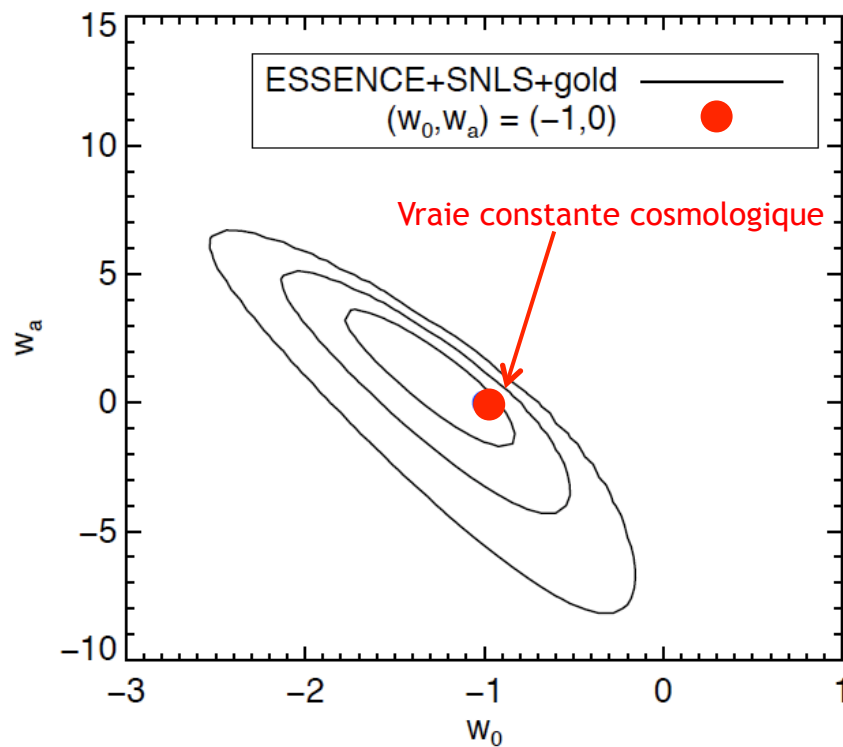
$$\begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix}$$

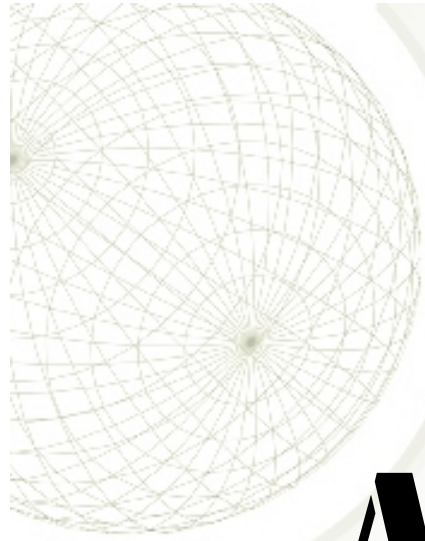
avec une équation d'état  $P \equiv w\rho$

- Permet de l'identifier à une **constante** cosmologique  $\Lambda g_{\mu\nu}$  si, et seulement si, on peut écrire
  - $\rho = \text{constante}$  (dans l'espace et dans le temps)
  - $P = \text{constante}$  (dans l'espace et dans le temps)
  - $P/\rho = w = -1$
- $\Rightarrow$  écrire  $w = w_0 + w_a * z$  et **vérifier si on a bien  $w_0 = -1$  et  $w_a = 0$**

# LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE EST-ELLE *CONSTANTE* ?

- On compare des observations à (relativement) petit  $z$  et à grand  $z$
- Quelles sont les contraintes actuelles?



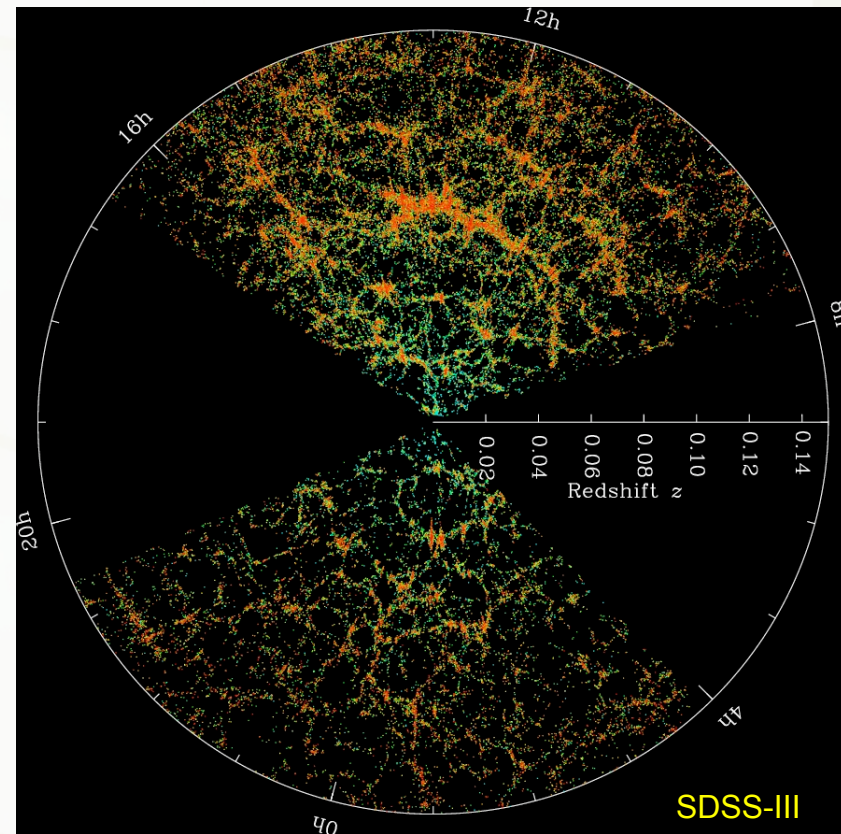


# **ALTERNATIVES À UNE CONSTANTE COSMOLOGIQUE**



## UNE BULLE « LOCALE » ?

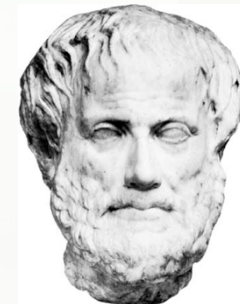
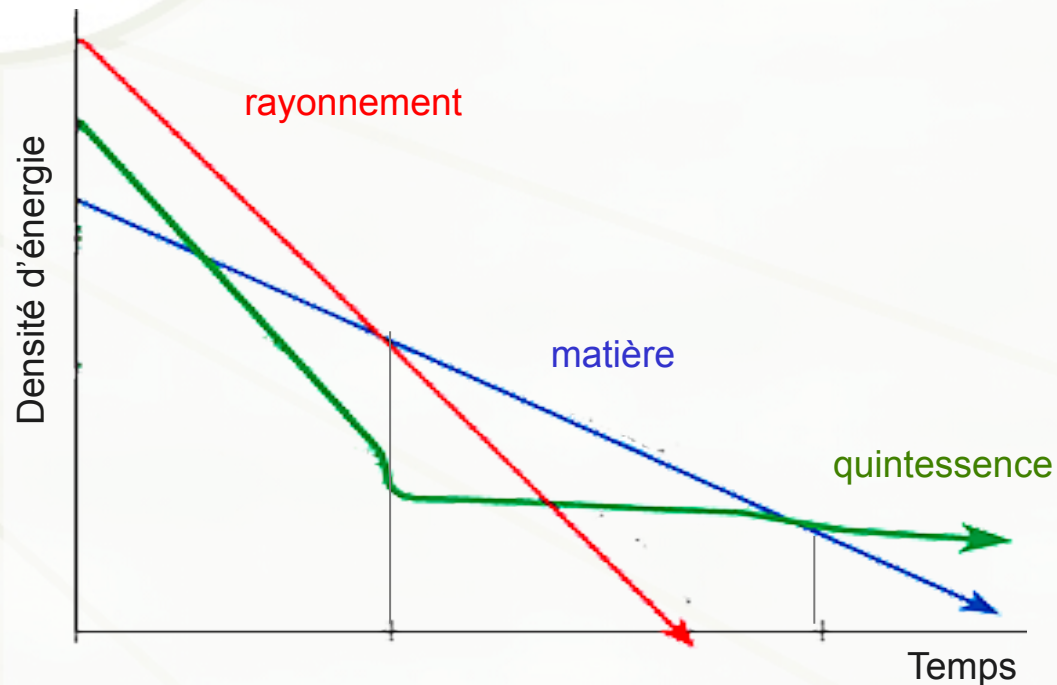
- Les comptages de galaxies en trois dimensions indiquent de grands espaces apparemment vides
  - Ce qui d'ailleurs pas sans poser des difficultés aux cosmologistes...
- Dans une bulle peu dense de **500 Mpc**
  - Moins de matière pour ralentir
  - Expansion plus rapide
- Imaginons un univers tel que
  - $\Omega_{\text{mat}} = 1.0$  et  $H = 50$  loin de nous ( $z > 0.1$ )
  - $\Omega_{\text{mat}} = 0.3$  et  $H = 72$  près de nous
  - *Âge commun de 14 milliards d'années*
- La constante de Hubble  $H$  est plus grande près de nous que loin  
→ accélération de l'expansion !
- C'est une solution possible
  - **Si nous sommes ~ au centre de la bulle!**





# QUINTESSENCE

- Ajoutons de nouveaux champs (= nouvelles particules) à la théorie
- Ajustons leurs interactions pour que leur énergie du vide évolue au fur et à mesure de l'expansion, jusqu'à dominer à une époque récente
- Ce n'est pas facile à réaliser... et le modèle n'a aucune autre justification



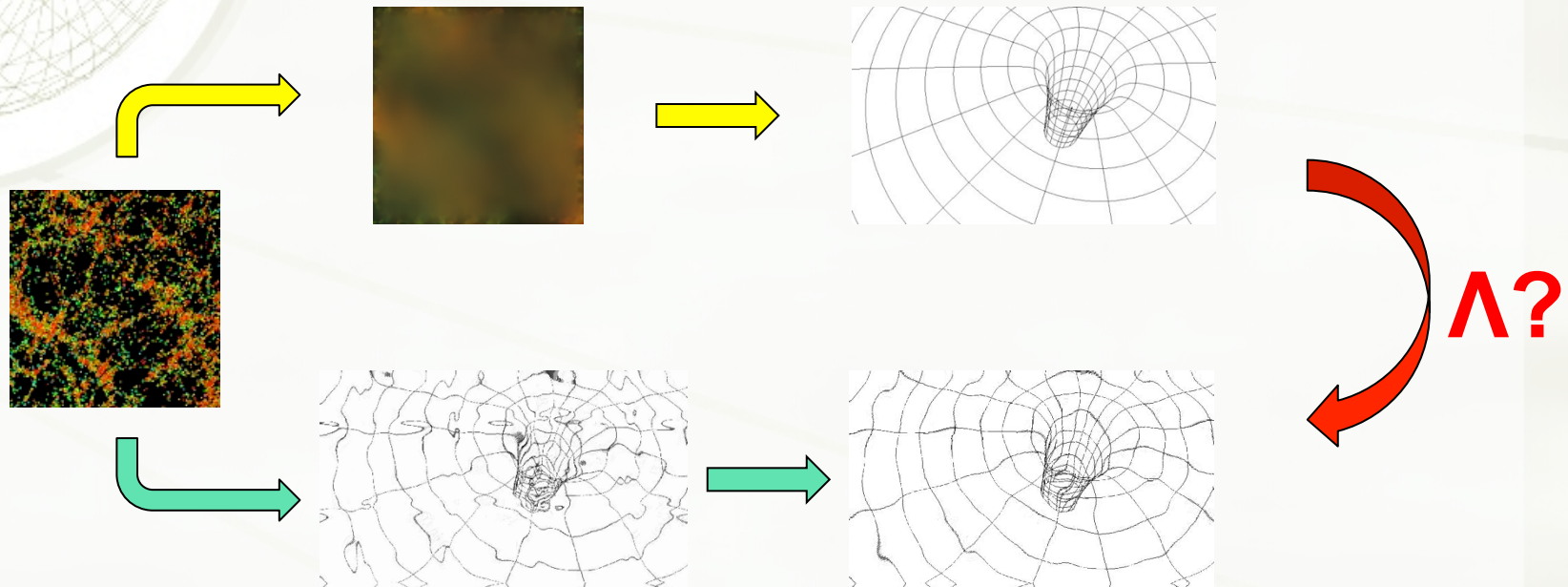
## Quintessence

La « cinquième essence » est, dans la physique d'Aristote, ce dont les astres sont formés, par opposition aux quatre essences (feu, air, eau et terre) dont est formé le monde sublunaire.

- Wait and see ...

## UNE QUESTION DE MOYENNE ...? $\langle G [g] \rangle \neq G [\langle g \rangle]$

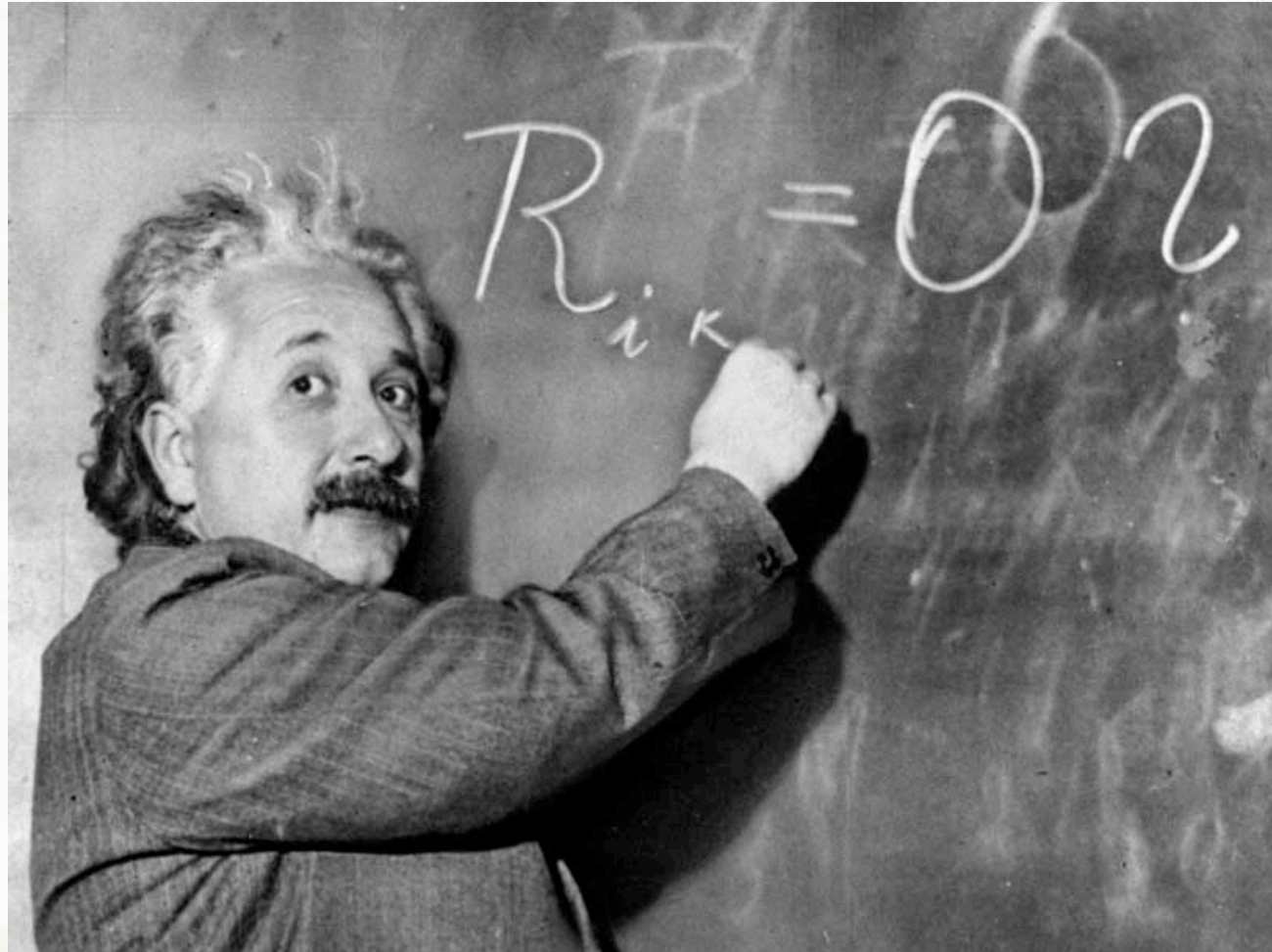
- L'équation d'Einstein a été résolue pour un univers homogène et isotrope, en calculant la géométrie (= la métrique  $g$ ) correspondante



- L'écart entre la **moyenne** de la **géométrie** et la **géométrie** de la **moyenne** pourrait imiter une constante cosmologique (*backreaction*)
  - Mais l'effet est important alors que l'écart à l'homogénéité est (relativement) faible → **Doute...**

## MODIFIER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ?

- Vous oseriez ?





# THÉORIES f(R)

- L'équation d'Einstein ( $G = T$ ) s'obtient à partir du Lagrangien  $\mathcal{L}$  d'Einstein-Hilbert

$$\mathcal{L} = R \quad (+ \mathcal{L}_{\text{matière}})$$

- Impossible de faire plus simple
- R est le « scalaire de Ricci » calculé à partir de la métrique  $g$

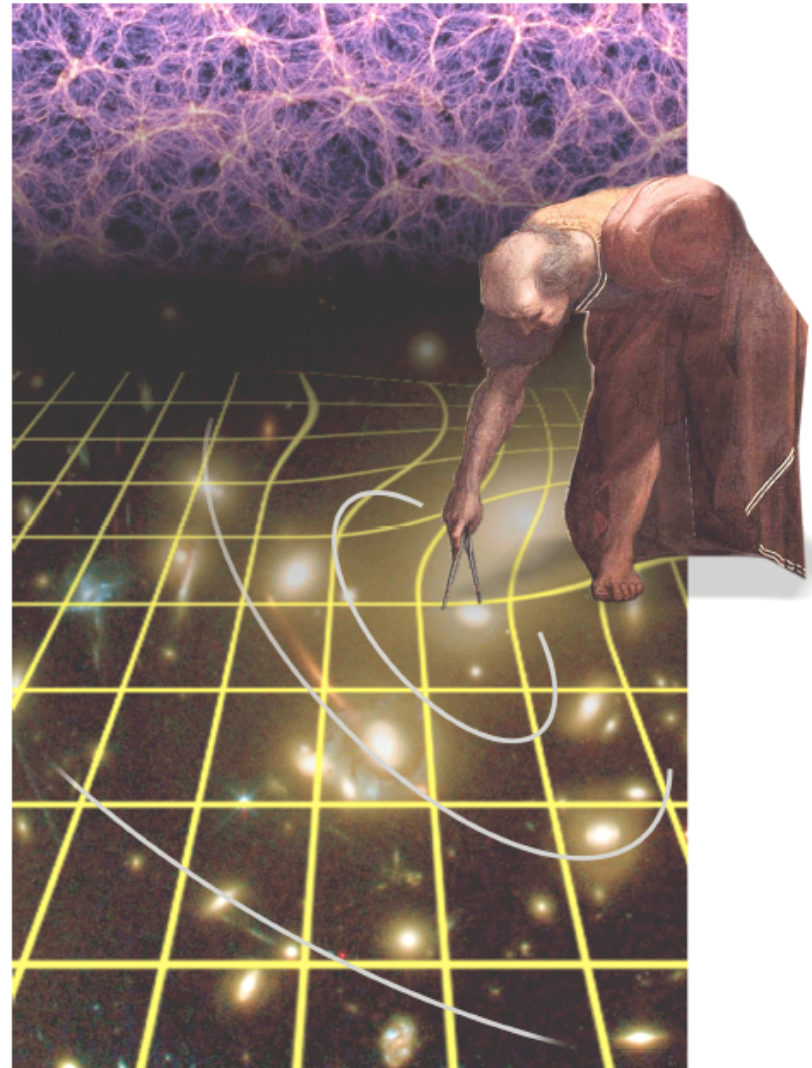
- Suggestion :

$$\mathcal{L} = f(R)$$

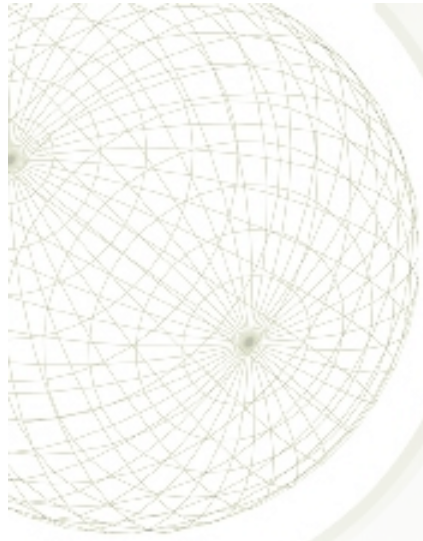
- et chercher une fonction  $f$  qui ne contredise pas tous les bons résultats de la relativité générale
  - Gravitation dans le système solaire ← relativité générale dans la limite newtonienne
  - Ralentissement des pulsars binaires ← relativité générale à courte distance
  - Tests cosmologiques ← relativité générale à grande distance
- Ce n'est pas gagné !

## ET MAINTENANT ?

- Pour aller plus loin
- Mesures plus précises
  - SN : EUCLID
  - CMB : Planck
  - BAO : LSST, EUCLID
- Progresser dans les théories
  - Bulle locale
  - Quintessence
  - Théories  $f[R]$
  - Cordes et branes
- Un des principaux objectifs de la prochaine décennie







**LES INDICATIONS  
EN FAVEUR DE LA**

**MATIÈRE NOIRE**

## UN PEU D'HISTOIRE

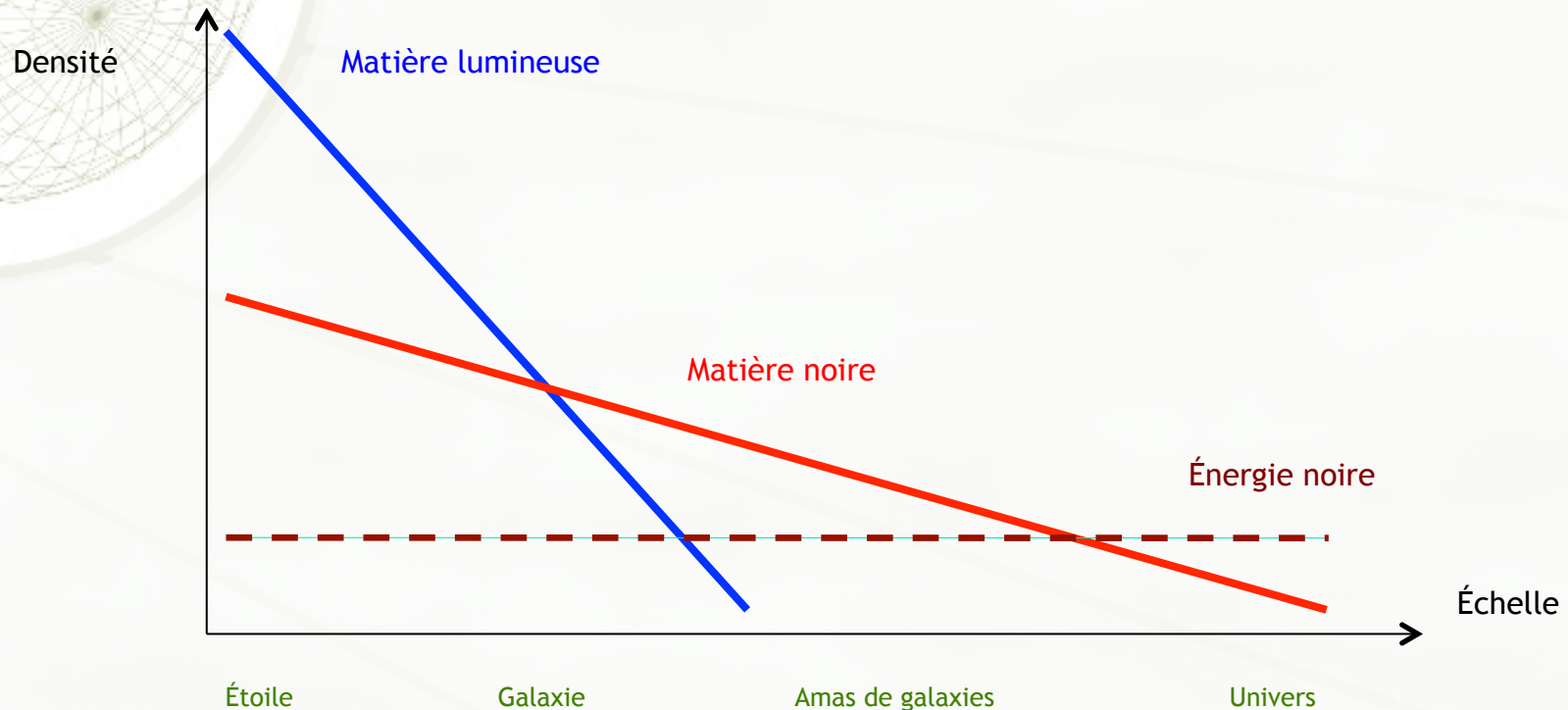
- En 1933, Fritz Zwicky annonça que l'amas de galaxies de Coma contenait 100 fois plus de masse que les galaxies elles-mêmes
- Les premières réactions furent – disons – mitigées :



- **Courbes de rotation de galaxies**
  - de plus en plus nombreuses
  - de plus en plus détaillées
- **Amas de galaxies**
  - dynamique confirmée
  - émission X intense du gaz chaud
  - distorsions gravitationnelles de la lumière (arcs)
- **Cosmologie du big bang**
  - formation des galaxies
  - supernovae
  - fluctuations du CMB

# DÉSACCORD QUANTITATIF MAIS AUSSI QUALITATIF

- La matière noire est beaucoup **plus diffuse** que la matière lumineuse

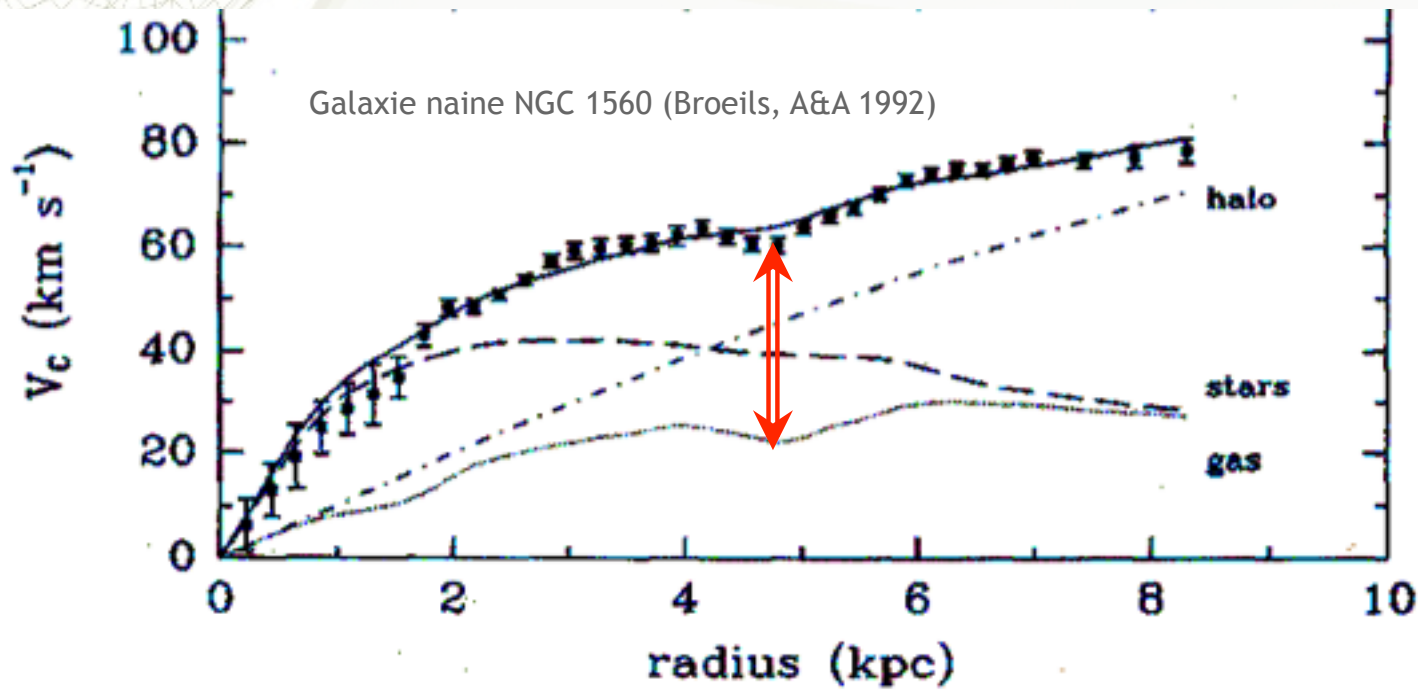


- → le problème de la matière noire augmente avec l'échelle
- → la matière noire est probablement de nature différente de la matière ordinaire

# CONSPIRATION



- Corrélation entre le profil requis pour le halo et la distribution de matière lumineuse



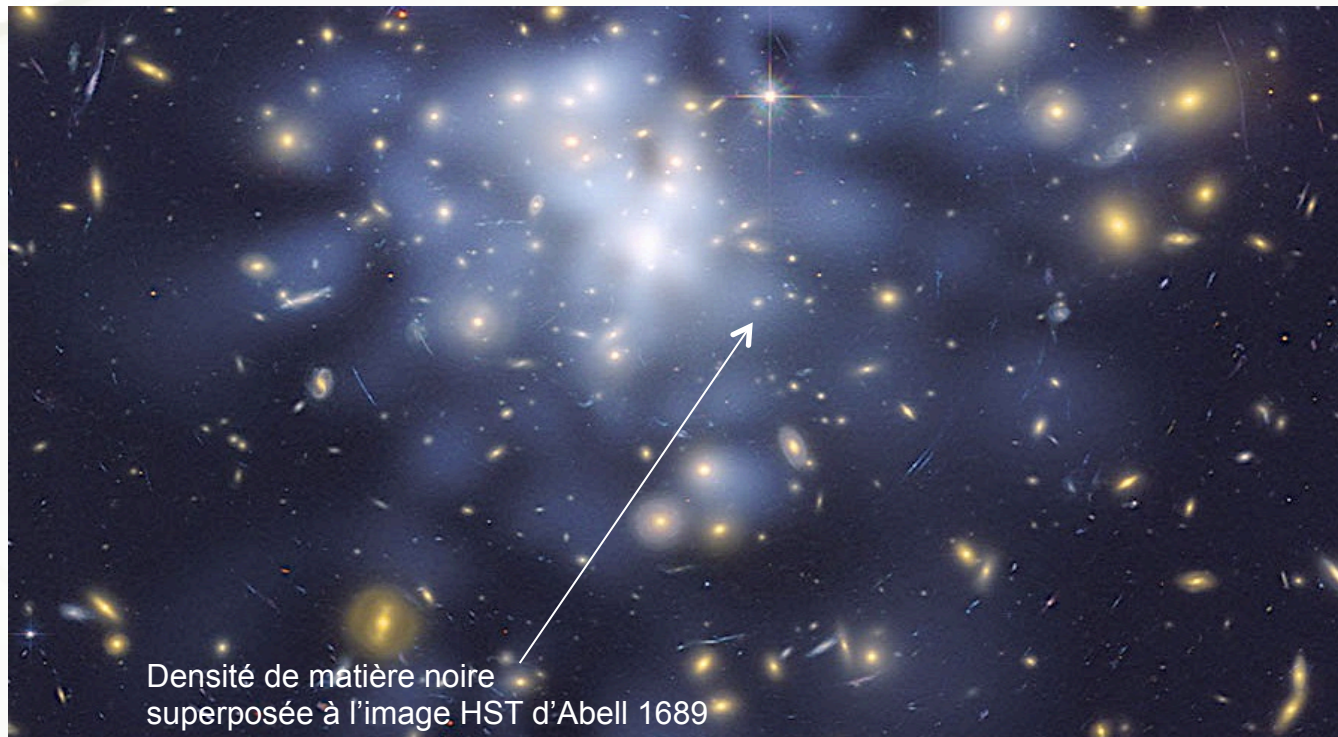
- → le halo est (peut-être) formé de matière ordinaire, mais non lumineuse
  - Étoiles peu lumineuses (naines brunes, naines blanches ou noires)
  - Gaz rayonnant peu, comme l'hydrogène moléculaire H<sub>2</sub>





# AMAS ET MATIÈRE NOIRE

1. Dynamique des galaxies à l'intérieur d'un amas
2. Profil de densité et de température du gaz chaud émetteur de rayons X
3. Distorsions gravitationnelles (arcs et arclets)





# FORMATION DES GALAXIES

## Instabilité gravitationnelle

- Une région dense attire la matière d'une région moins dense → le **contraste de densité**  $\delta\rho/\rho$  augmente avec le temps
  - univers statique  $\Rightarrow \delta\rho/\rho \nearrow \exp\{\text{temps } t\}$
  - univers en expansion  $\Rightarrow \delta\rho/\rho \nearrow$  avec le paramètre d'échelle  $\propto 1/1+z$
- CMB :  $\delta T/T < 10^{-4}$ 
  - $\Rightarrow \delta\rho_B/\rho_B < 10^{-4}$  à  $z \sim 1100$  pour la matière ordinaire (baryons) couplée aux photons
  - $\Rightarrow \delta\rho_B/\rho_B < 10^{-1}$  à  $z \sim 0$
- Mais les amas de galaxies ont  $\delta\rho/\rho \gg 1$

## ⇒ Nécessité de matière noire

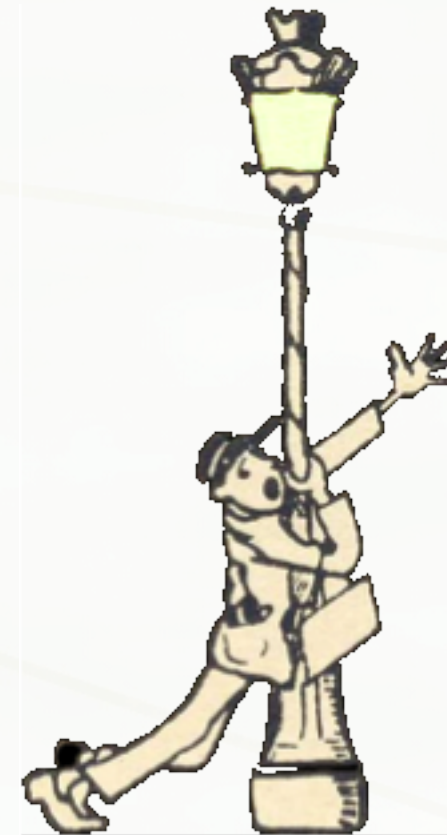
- La matière noire n'est pas couplée aux photons
- $\Rightarrow$  elle peut être plus concentrée que les baryons à  $z \sim 1100$  sans que cela apparaisse dans le CMB
- $\Rightarrow$  scénario
  - fluctuations initiales  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-4}$  pour toutes les formes de matière
  - la matière noire augmente son **contraste de densité** dès  $z \sim 10^4$
  - les baryons restent bloqués par la pression de rayonnement à  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-4}$  jusqu'à la recombinaison
  - puis ils sont attirés par la matière noire



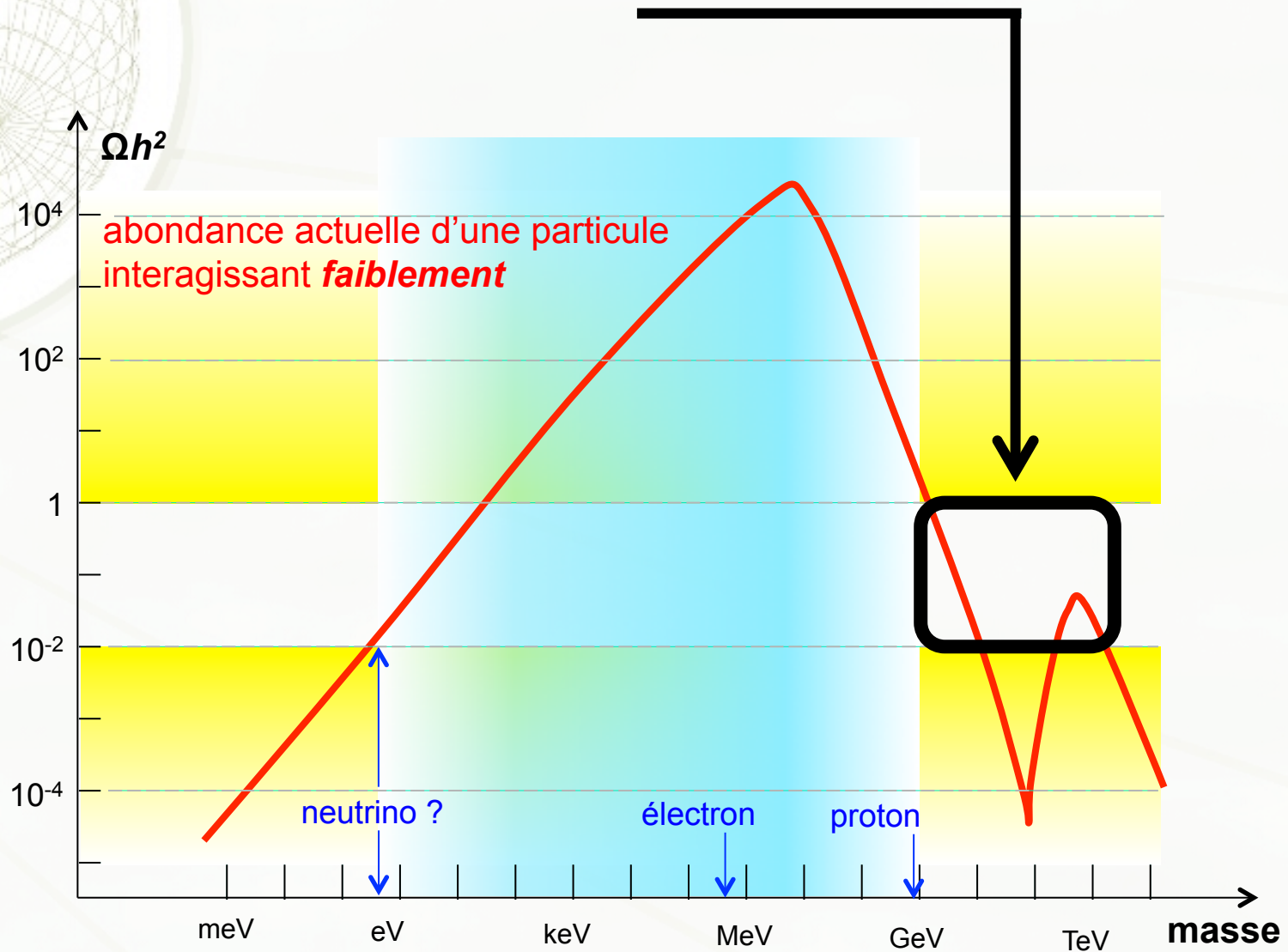
# **SI LA MATIÈRE NOIRE EXISTE, QUELLE EST SA NATURE?**

# CHERCHER SES CLÉS SOUS LE RÉVERBÈRE

- De quoi est formée la matière noire ?
  - TRÈS longue liste de candidats imaginés
  - Mais on ne peut chercher que ce qu'on sait trouver
  - En espérant avoir la chance de trouver quelque chose
  - Idée la plus naturelle : une forme non lumineuse de la matière ordinaire
    - petites étoiles, trous noirs, gaz, etc.
  - MAIS
    - Amas de galaxies
    - Nucléosynthèse du big bang
    - CMB
- }  $\Rightarrow \Omega_B \approx 0,04 \ll \Omega_{\text{matière}} \approx 0,27$



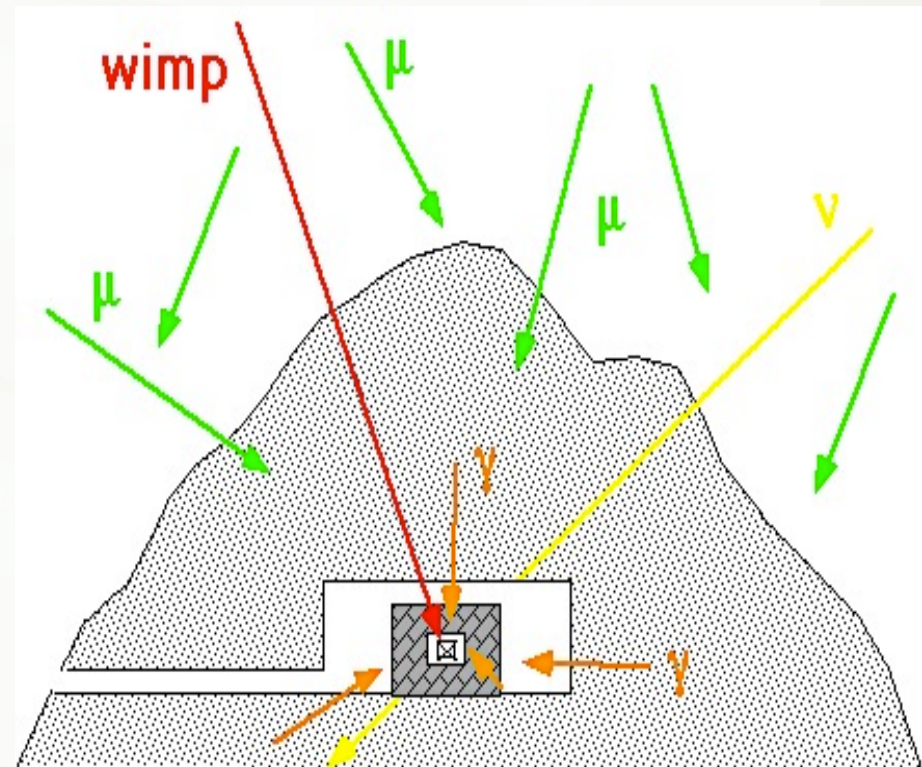
# LE « MIRACLE » WIMP ?





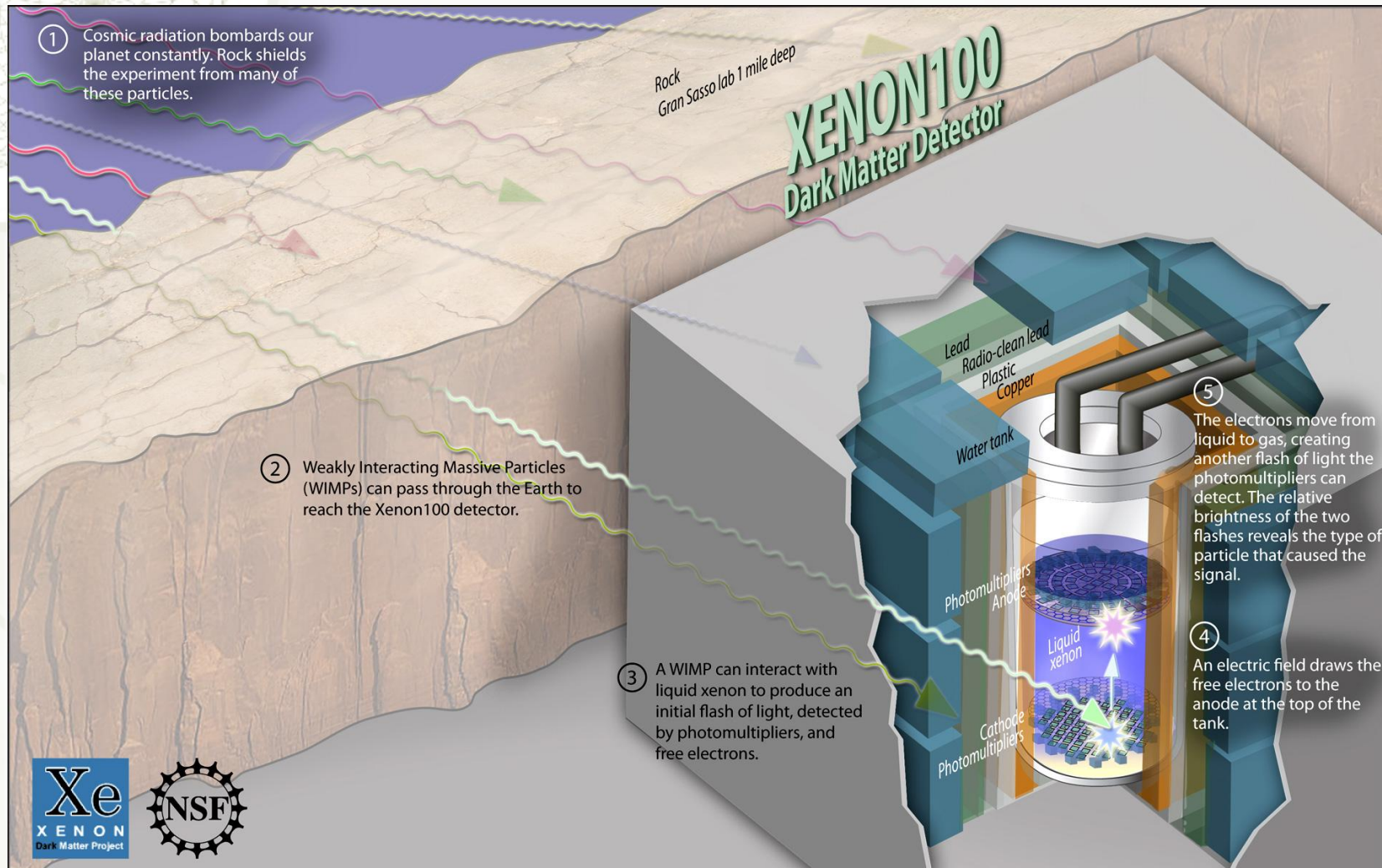
# OBSERVER L'UNIVERS DU FOND D'UN TUNNEL

- Un WIMP du halo cogne un noyau dans un cristal de germanium ou un scintillateur (xénon)
- **Le choc est détecté**
  - lumière
  - chaleur
  - vibrations
- **Difficulté: cosmiques et radioactivité font pareil**
  - donc on s'enterre...
  - on blinde le détecteur...
  - on le refroidit vers  $-100^{\circ}\text{C}$  ou  $-270^{\circ}\text{C}$ ...
  - on élimine les parasites...
- On attend patiemment.....



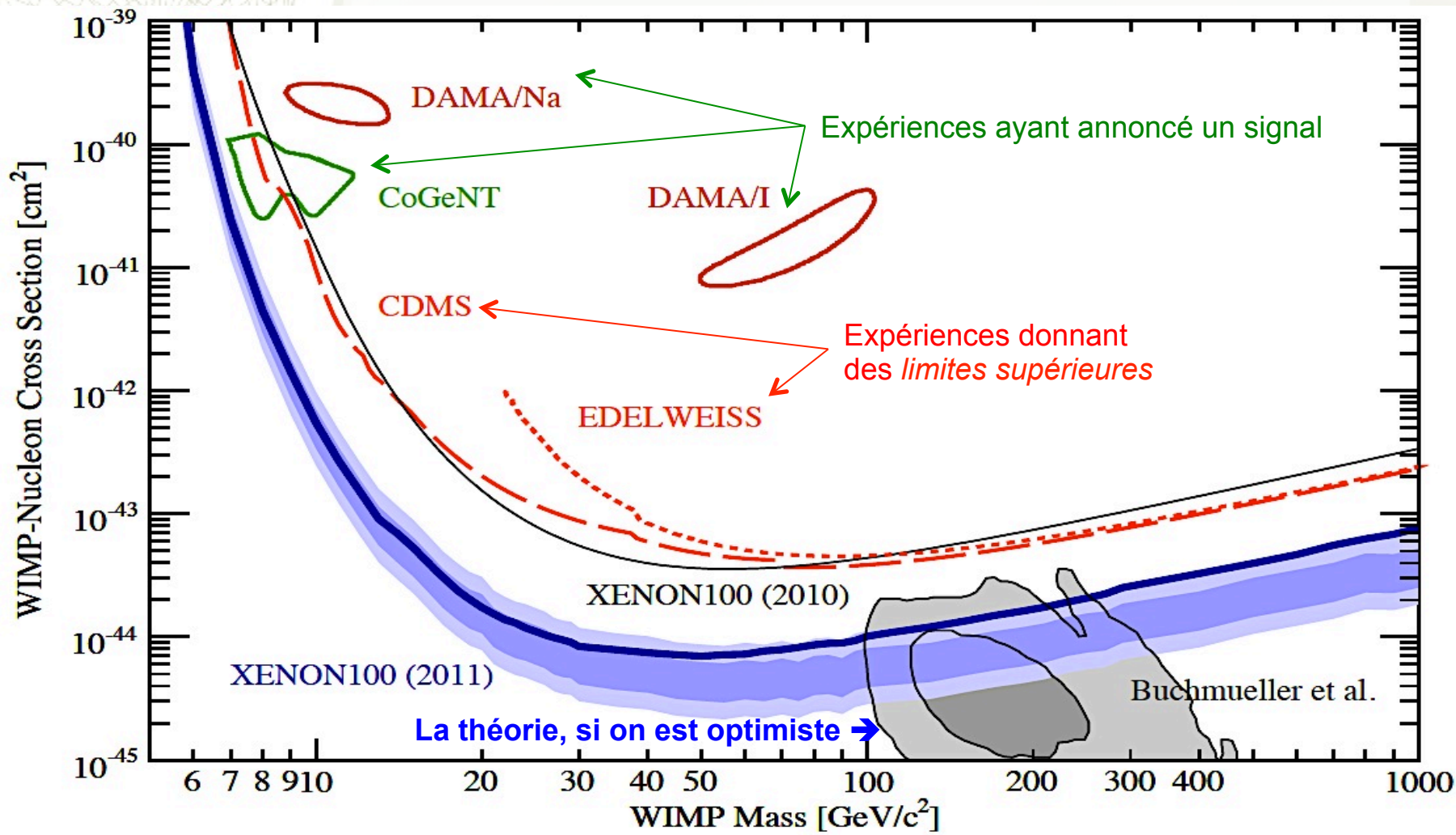


# EXPÉRIENCE XÉNON 100 : 100 KG DE XÉNON LIQUIDE



# EXPÉRIENCE XENON-100

© APRILE ET AL. (AVRIL 2011)

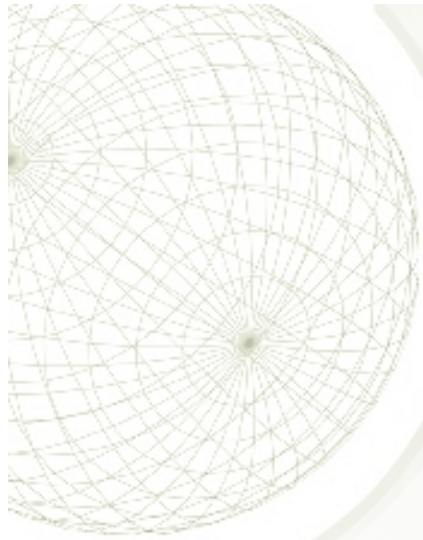




## BILAN

- Les astronomes sont à peu près certains de l'existence de la matière noire
- Mais ils n'ont aucune idée de sa nature
- Élimination des possibilités les unes après les autres
  - Matière ordinaire sous toutes ses formes (sauf peut-être *dans* les galaxies)
  - Neutrinos légers
  - MOND
- Recherches directes → des alertes mais aucun résultat fiable
- Recherches indirectes → aucun résultat pour le moment





■ C'est fini !

