

# Astrophysique

## 24 – Le côté obscur de l'univers



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



# Une question d'actualité



Laurent SACCO

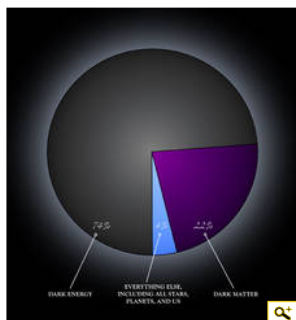
## La mystérieuse énergie noire - 21/10/2010

### La mystérieuse énergie noire

La découverte imprévue de l'expansion accélérée de l'univers en 1998 a nécessité de reconsidérer une vieille énigme de la physique et de la cosmologie, remontant aux travaux d'Einstein : celle de la constante cosmologique.

Étroitement liée à la notion d'énergie du vide quantique, l'expansion accélérée impliquerait que plus de 70 % du contenu de l'univers est sous forme d'une énergie inconnue. Face à cette énergie inconnue, celle équivalent à la masse de la matière composant les étoiles et les cellules de notre corps apparaît comme une quantité presque négligeable. Cette énergie mystérieuse, signalant peut-être une nouvelle physique au-delà du modèle standard, a reçu le nom d'« énergie noire » (*Dark energy* en anglais).

Plusieurs explications théoriques ont été proposées à son sujet et ce dossier a pour but de passer en revue certaines d'entre elles, parmi les plus prometteuses. Pour cela, Futura-Sciences a interviewé l'un des grands spécialistes français de ces théories, [Philippe Brax](#), qui a bien voulu nous faire bénéficier de ses lumières en répondant à nos questions.



Un schéma montrant la part relative de l'énergie noire (*dark energy*) dans l'univers. Son estimation varie mais on donne généralement une valeur légèrement supérieure à 70 %. La matière normale ne compterait que pour 4 % environ dans le contenu énergétique de l'univers observable, le reste étant de la matière noire (*dark matter*) © Nasa CXC M.Weiss



# Même la grande presse en a parlé !

30

## GRAND ANGLE

Des astrophysiciens ont apporté une nouvelle preuve que l'expansion de l'univers s'est accélérée depuis quelques milliards d'années. Mais pourquoi ? Ils soupçonnent une énigmatique énergie noire.

Par SYLVESTRE HUET

**P**reuve. En anglais, «evidence», lit-on dans le titre d'un article publié dans le dernier numéro de la revue *Astronomy & Astrophysics* (1). Les scientifiques, gens en général prudents, ne sortent ce terme que sûrs de leur coup. Aussi, lorsque l'on découvre que la «preuve» annoncée par une équipe d'astrophysiciens européens et américains concerne le mouvement d'expansion de l'univers tout entier, un sentiment s'impose : c'est du lourd.

«L'univers accélère» affirme donc cette équipe où l'on trouve Karim Benabed et Yannick Mellier, rencontrés à l'Institut d'astrophysique de Paris (CNRS). Il accélère depuis sept milliards d'années. Cela peut sembler long, mais ne représente qu'un peu moins de la moitié de l'âge de l'univers connu, dont l'histoire débute avec le big bang, il y a un peu plus de treize milliards d'années. A l'époque, l'univers était très dense, très chaud, homogène et très petit. Aujourd'hui, il est très vide, très froid, très inhomogène (de grands vides séparant des regroupements de matière) et très grand. Son histoire est celle d'une expansion. Mais à quelle vitesse ?

### Quelque chose cloche

Ce paramètre, décisif pour décrire l'histoire et la géométrie du cosmos est baptisé «constante de Hubble», explique Yannick Mellier, car elle est née en 1929 des observations d'Edwin Hubble : plus les galaxies sont loin de nous et plus elles s'éloignent vite. Ce mouvement décale leur lumière vers le rouge, un peu comme le son d'un camion de pompier devient plus grave au fur et à mesure qu'il s'éloigne.

Depuis la découverte d'Edwin Hubble, mesurer la vitesse de cette expansion constitue «l'un des objectifs prioritaires des observateurs», affirme Karim Benabed. Cette vitesse détermine en grande partie la figure générale du cosmos, elle permet d'accéder à son passé comme à son destin. Mais, là, Yannick Mellier sourit : «Le problème, c'est que la constante de Hubble... n'est pas constante. Aujourd'hui, je veux dire ici et maintenant, elle vaut environ 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec [1 parsec = 3,26 années lumière]». A l'origine, on pensait que l'expansion de l'univers – après avoir été vertigineuse au début de l'univers, après le

empêcher de s'éloigner l'une de l'autre. Pour les «tenir» entre elles, il faut une force gravitationnelle bien plus puissante, et donc une masse gigantesque en surplus de ce que les télescopes voient. Les astronomes ont donc imaginé une «matière noire», invisible et de nature inconnue, représentant quatre ou cinq fois la masse des étoiles, des poussières et du gaz. Depuis, la quête de cette matière noire se poursuit, tant dans le ciel que dans les accélérateurs de particules... sans aucun succès. Pourtant, plus on regarde le ciel et plus le mouvement des étoiles, des galaxies et l'histoire de l'univers plaident en faveur de sa présence, perceptible uniquement en raison de son effet gravitationnel.

### Une masse de quoi ?

En poursuivant leur enquête, les cosmologistes en arrivent à cette conclusion ébouriffante : les trois quarts du contenu en masse et énergie de l'univers sont inconnus. Une conclusion dictée par une découverte : «L'univers est plat», explique Karim Benabed. Plat ? Les deux scientifiques sont en mal de métaphore afin d'aider le pauvre journaliste. «L'univers est euclidien»,

un champ céleste tout petit, dans la constellation de la Baleine, près de l'étoile Spica. Un champ très noir, dénué d'étoiles proches, on il a pu détecter près de 500 000 galaxies dont les plus lointaines se situent aux confins de l'espace/temps, à près de 12 milliards d'années lumière. «Au VLT, raconte Mellier, nous avons utilisé un instrument exceptionnel installé sur Melpal, l'un des quatre télescopes de 4 mètres de l'observatoire». Cet instrument (Vimos) construit par une équipe européenne conduite par Olivier Le Fevre (observatoire de Marseille), accepte des masques dans lesquels «on a percé 800 infimes fentes de deux microns, pointées vers autant de galaxies identifiées. Cela permet d'obtenir leur spectre lumineux, et donc de calculer leur décalage vers le rouge et leur distance.» Un travail minuscule qui a permis de positionner près de 150 000 galaxies et de réaliser une cartographie en trois dimensions de cette minuscule portion d'univers, mais allant jusqu'à ses confins.

## L'univers met

matier (au National Laboratory Lawrence Berkeley) – avaient cherché durant près de dix ans à mesurer la décelération de l'univers en utilisant des supernovae comme témoins. Ces supernovae correspondent à l'explosion de naines blanches, un type d'étoiles. Durant quelques jours, elles brillent alors comme dix milliards de Soleil, puis disparaissent de la vue des télescopes. Leur brillance intrinsèque étant bien connue, il est possible de calculer leur distance comme leur vitesse d'éloignement. Surprise : les deux équipes découvrent qu'il y a environ 7 milliards d'années – soit la moitié de l'âge de l'univers, «la constante de Hubble ne valait pas celle prédite pour une expansion sans accélération», précise Yannick Mellier. A l'époque, grand trouble dans les labos. Certains doutèrent de la mesure. «Surtout ceux qui n'étaient pas spécialistes des supernovae», s'amuse Mellier. Mais beaucoup sont alors rassurés et excités par la découverte, car elle vient compléter un puzzle ahurissant, celui du contenu de l'univers. Les astrophysiciens ont en effet un grave problème de masse. Des les années 1930, on se rendait compte que quelque chose cloche. Les galaxies ne pourraient rester liées en amas par la gravitation de leur seule masse visible. Cette dernière est insuffisante pour les

deformation provient de légères déviations de la trajectoire des photons, attirés par la masse gravitationnelle. Du coup, au lieu de montrer leur forme réelle, les galaxies apparaissent comme des «lignes caractéristiques» de la distribution de la matière noire de l'univers. Un énorme travail de statistique, de calculs, de comparaison avec la modélisation numérique de l'univers a suivi ces observations. Une étude menée par une équipe de 22 astrophysiciens, sous la coordination de Tim Schrabback (université de Leiden au Pays-Bas). En est sorti une sorte de «tomographie» du cosmos, un découpage par tranche d'espace/temps où la déformation des galaxies les plus lointaines par la matière noire permet de cartographier la distribution de cette dernière aux différentes époques de l'histoire de l'univers. Conclusion : «L'univers accélère bel et bien depuis sept milliards d'années», affirme Yannick Mellier.

### Le côté obscur

Pourquoi ? Les cosmologistes aimeront bien répondre simultanément à deux questions : ce qui accélère l'expansion de l'univers pourrait-il en être la cause ? Les trois quarts de son contenu, pour l'instant invisible et totalement inconnu ? L'accélération pourrait en effet s'expliquer par une

LIBÉRATION JEUDI 29 AVRIL 2010



31



énergie... noire ! Les astronomes aiment bien ce mot, c'est leur côté obscur qui se signale ainsi. Noire puisqu'on ne la voit pas. Noire parce qu'on ignore sa nature. Énergie dont la contribution à la masse de l'univers croît avec l'expansion, car elle en occupe le moindre espace. Du coup, très discrète à ses débuts, elle serait devenue le facteur principal du destin de l'univers, il y a sept milliards d'années au fur et à mesure de l'expansion. Miracle, c'est quelque

chose qui a «la soeur, la couleur, l'odeur de la constante cosmologique d'Einstein», note Alain Blanchard (université de Toulouse). Une constante qui, dans l'esprit d'un Albert Einstein écrivant les équations de la relativité générale avant la découverte de l'expansion de l'univers, devait lui permettre d'être stable. Peu après, le physicien abandonnait ce concept devant la découverte de l'expansion. La remarque d'Alain Blanchard est

d'autant plus savoureuse que ce cosmologiste fait partie des rares «résistants» à avoir tenté de trouver des alternatives à cette idée. Et soupire, «il est de plus en plus difficile d'y échapper». Mais quelle est la nature physique de cette énergie noire, si elle correspond à cette constante cosmologique inventée par Einstein ? «Mystère profond», admet Mellier. Les tentatives de la relier à la physique quantique débouchent sur une impasse.

L'univers accélère bel et bien depuis sept milliards d'années.

PHOTO NASA/ESA

Physiciens et cosmologistes les savent, et s'en réjouissent in petto : pour résoudre l'énigme de l'accélération de l'univers comme celle de son contenu, il faudra bouleverser les concepts les plus fondamentaux de la physique. Annonce d'une nouvelle révolution, aussi spectaculaire que celle de la physique quantique et relativiste d'il y a cent ans.

(© Tim Schrabback et al., avril 2010.)

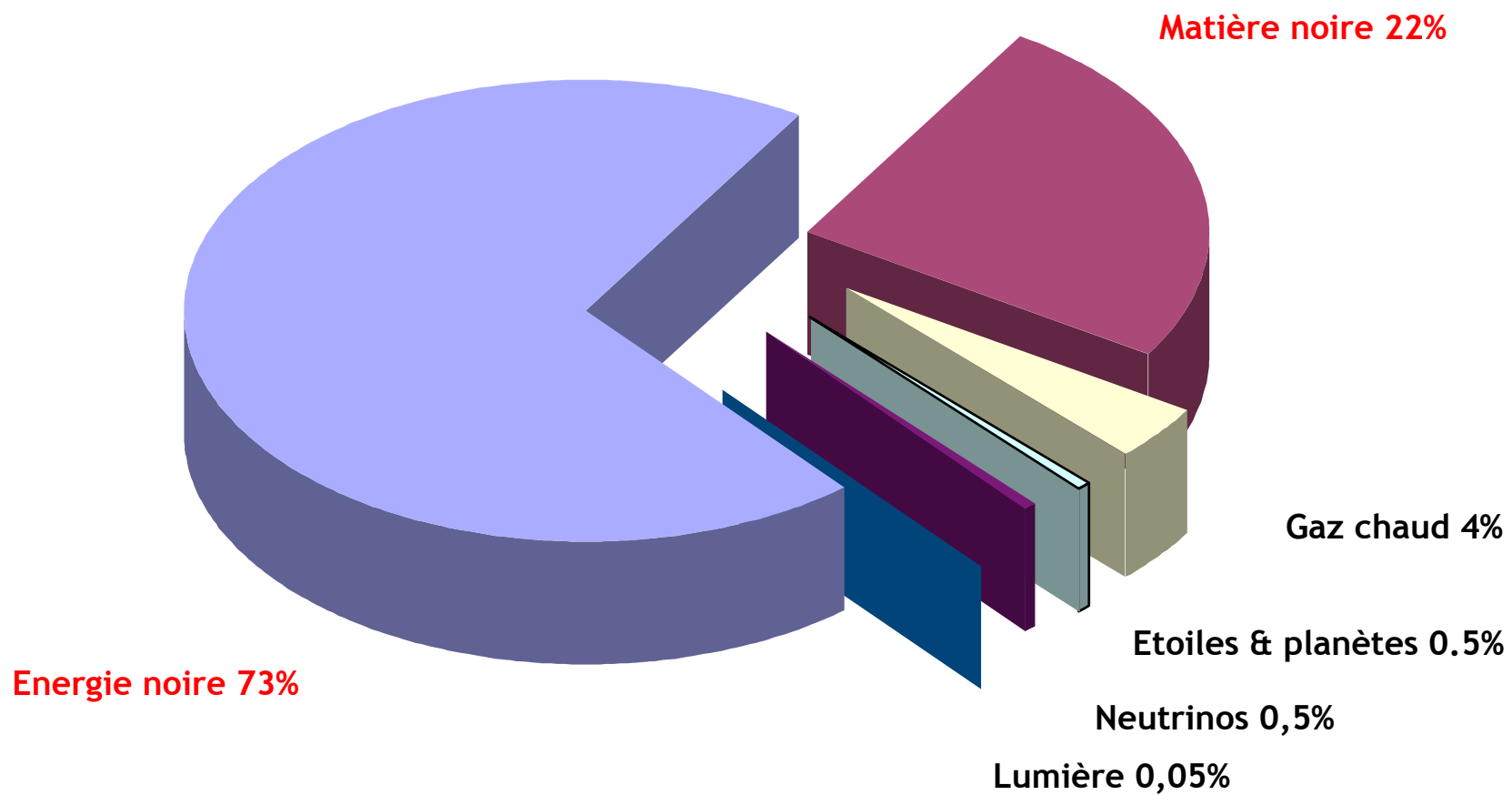


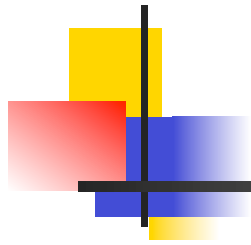
Même moi j'en parle !



## La question, en un dessin

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

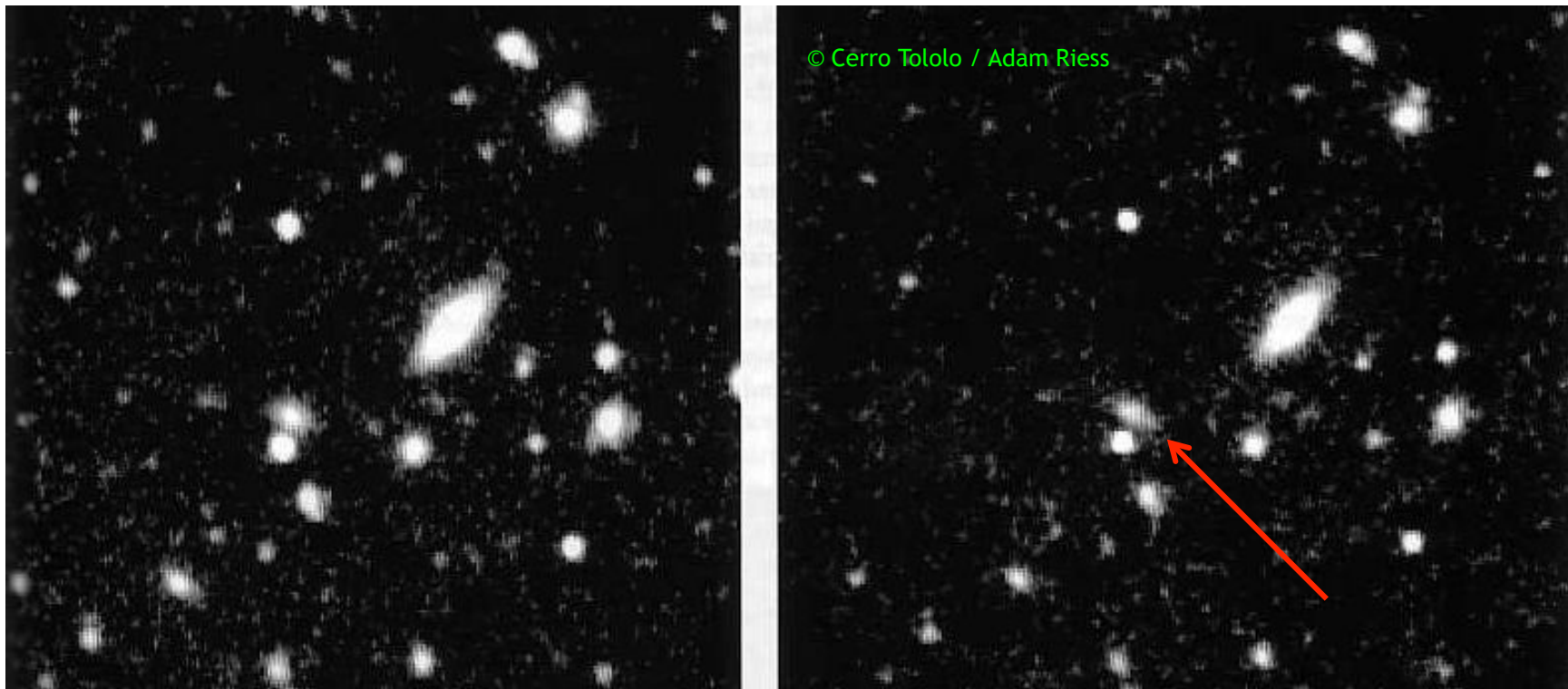




# ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION

# Supernovae

Une supernovae est une étoile qui explose : pendant quelques semaines, elle est presque aussi brillante que la galaxie hôte. On la détecte en comparant deux images prises à quelques semaines d'intervalle :

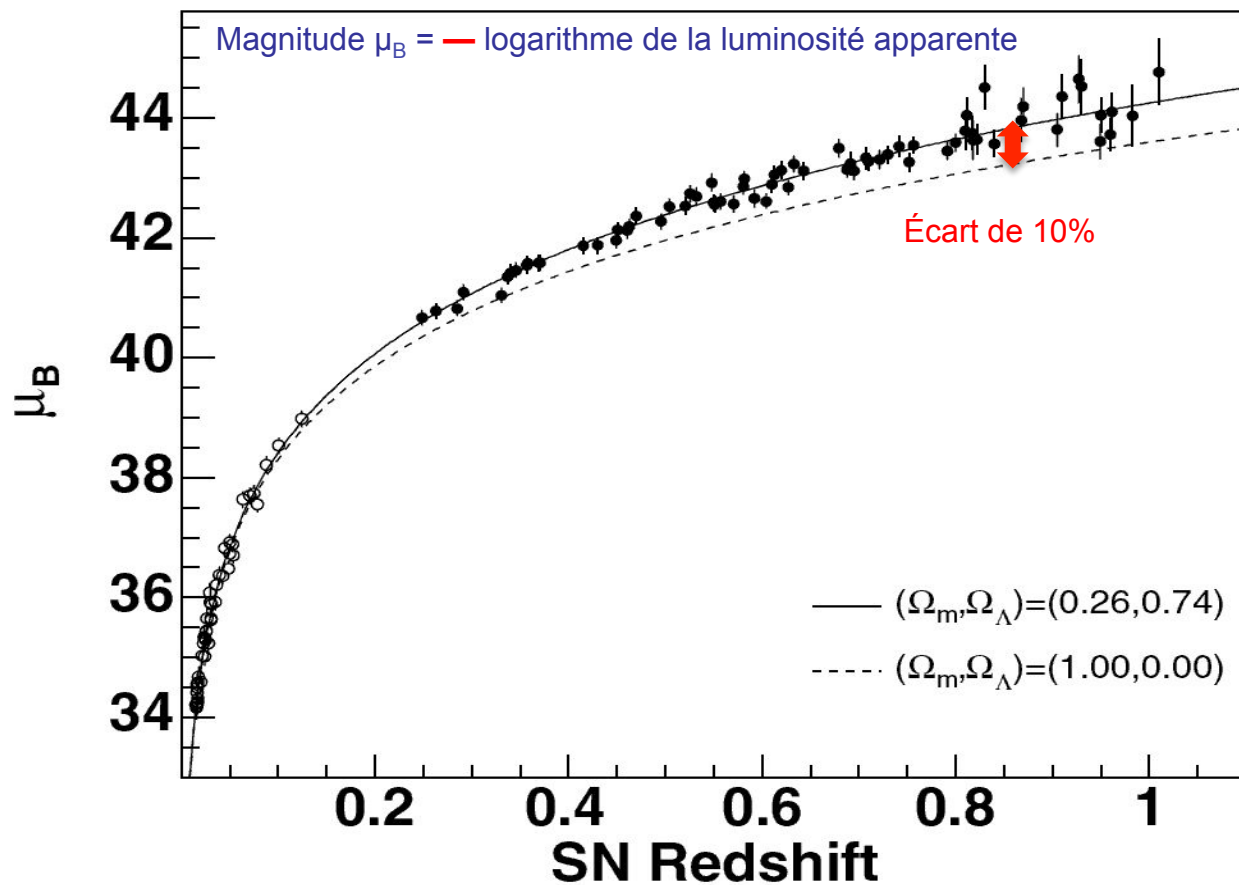


On connaît sa luminosité **absolue**, on mesure sa luminosité **apparente**: la comparaison donne la distance

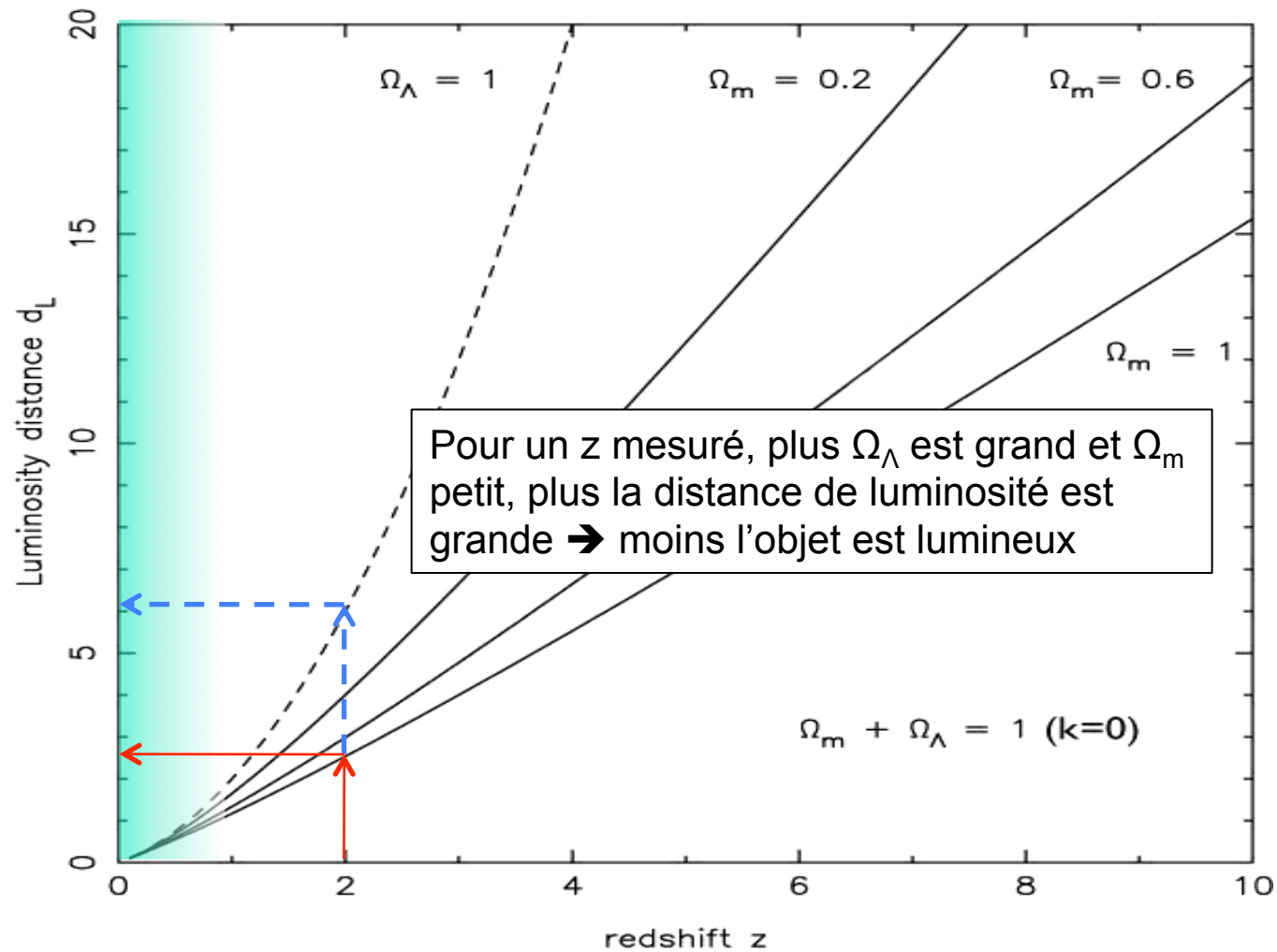


# Les supernovae sont moins lumineuses que prévu

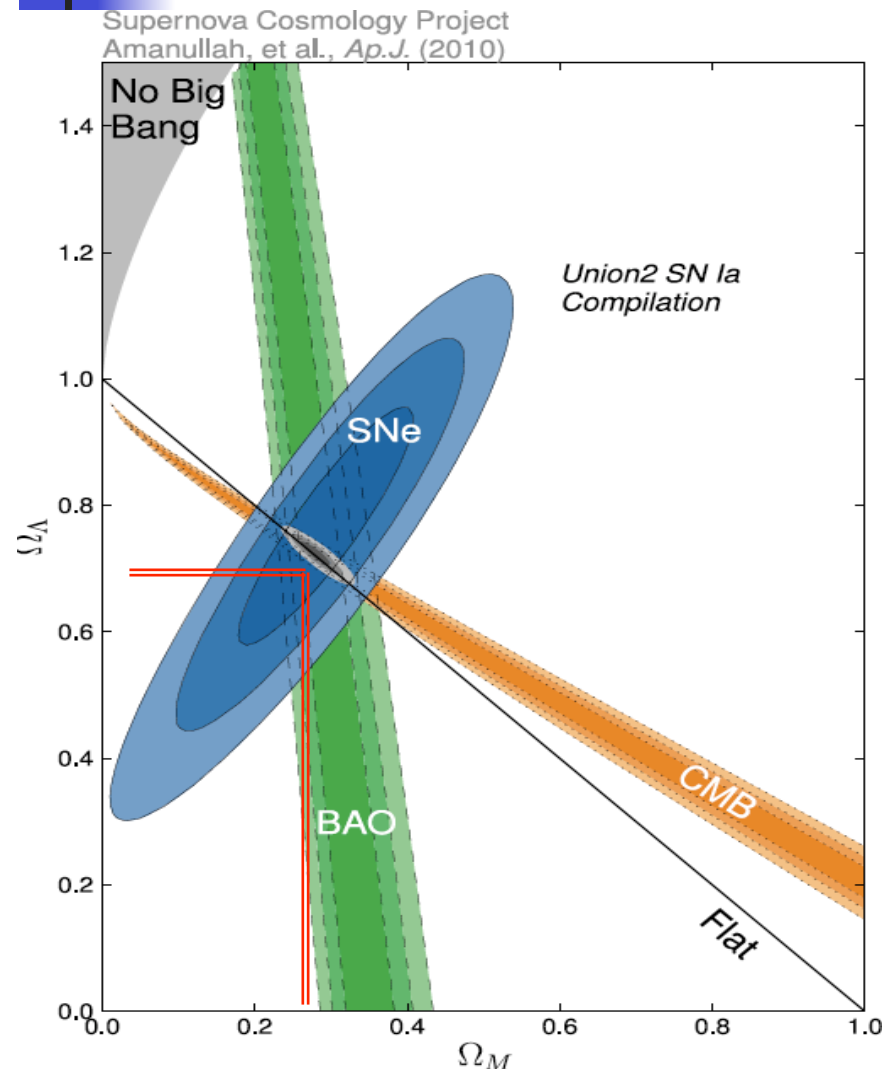
→ elles sont plus éloignées que prévu → l'expansion est plus rapide que prévu →  
**accélération**



## La relation distance-redshift dépend de $\Omega_{\text{mat}}$ et $\Omega_{\Lambda}$



# SN + CMB → matière noire + énergie noire



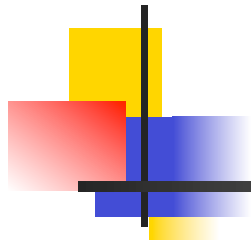
- Position du premier pic acoustique du CMB → courbure spatiale  $\Omega_k \sim 0$

$$\rightarrow \Omega_\Lambda + \Omega_{mat} \sim 1,0$$

- Accélération de l'expansion → autre combinaison

$$\frac{1}{2} \Omega_{mat} - \Omega_\Lambda \sim -0,6$$

- →  $\Omega_{mat} \sim 0.27 \rightarrow$  matière noire  
 $\Omega_\Lambda \sim 0.73 \rightarrow$  énergie noire



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



## L'équation d'Einstein

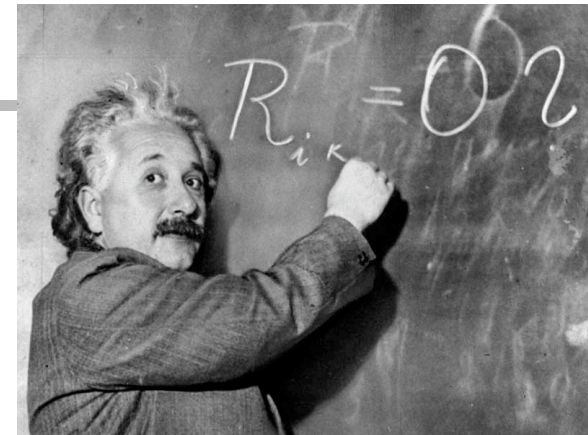
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (R - \Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

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

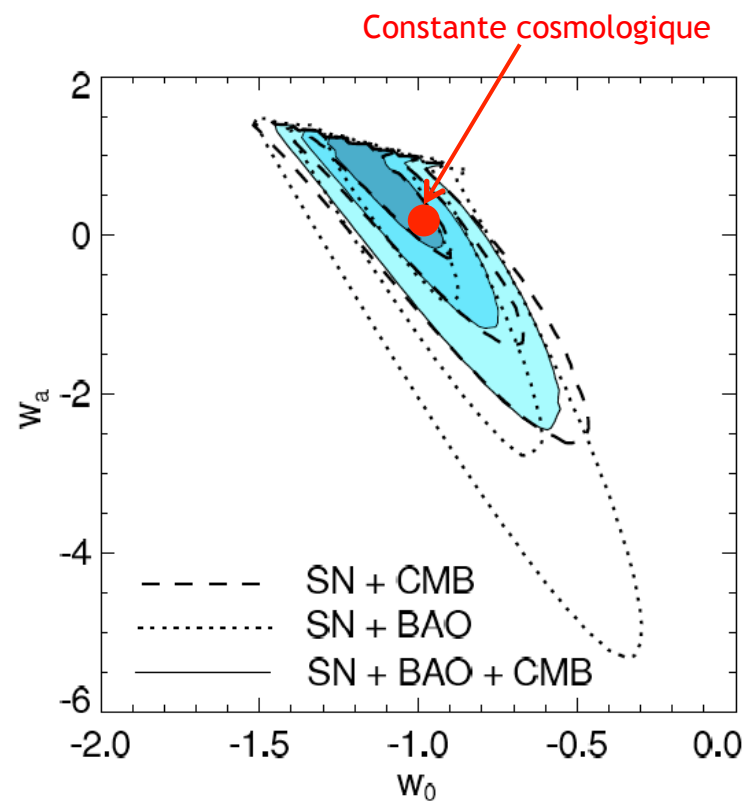
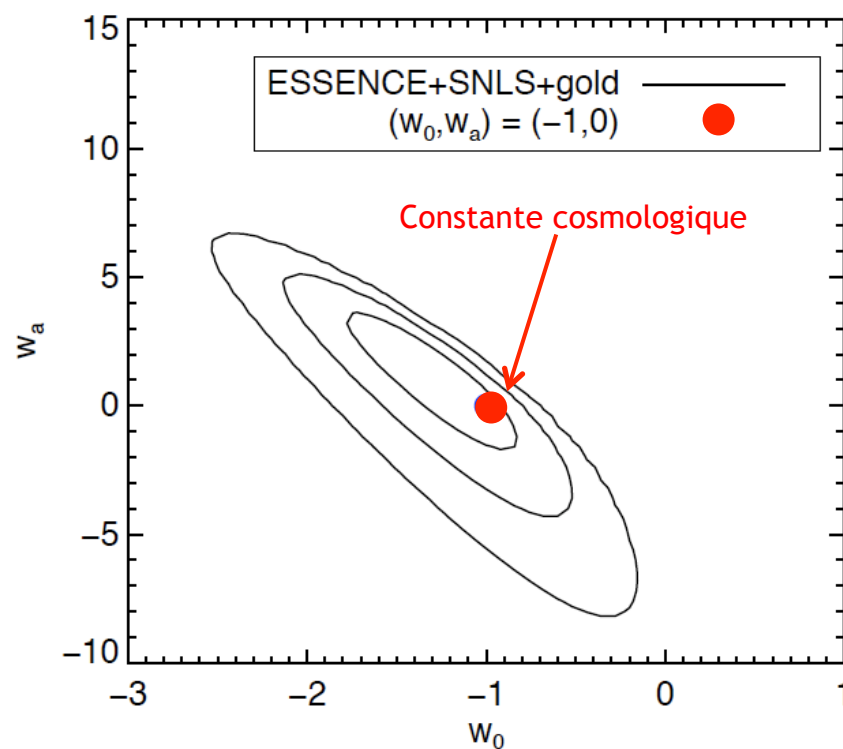
Le Tao est comme le vide éternel,  
empli d'infini possibilités.  
Il est caché mais toujours présent.  
[Laozi, Daodejing]



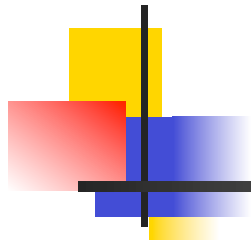
- Matière et rayonnement  $\equiv$  **champs** (=existant en tout point de l'espace)
- Particules  $\equiv$  **excitations** du champ matérialisées en certains points
  - *Champ électromagnétique*  $\rightarrow$  photons
  - *Champ électronique*  $\rightarrow$  électrons *etc.*
- Absence de particule  $\equiv$  **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

## La constante cosmologique est-elle *constante* ?

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



- Aucune indication — **pour le moment** — d'une variation au cours du temps

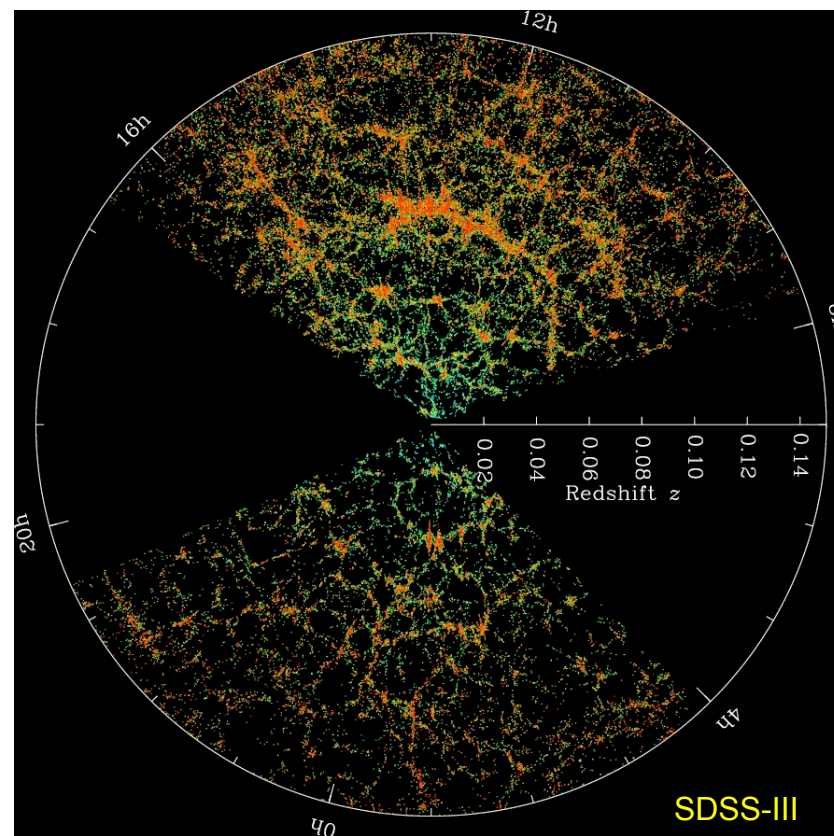


# ALTERNATIVES À UNE CONSTANTE COSMOLOGIQUE



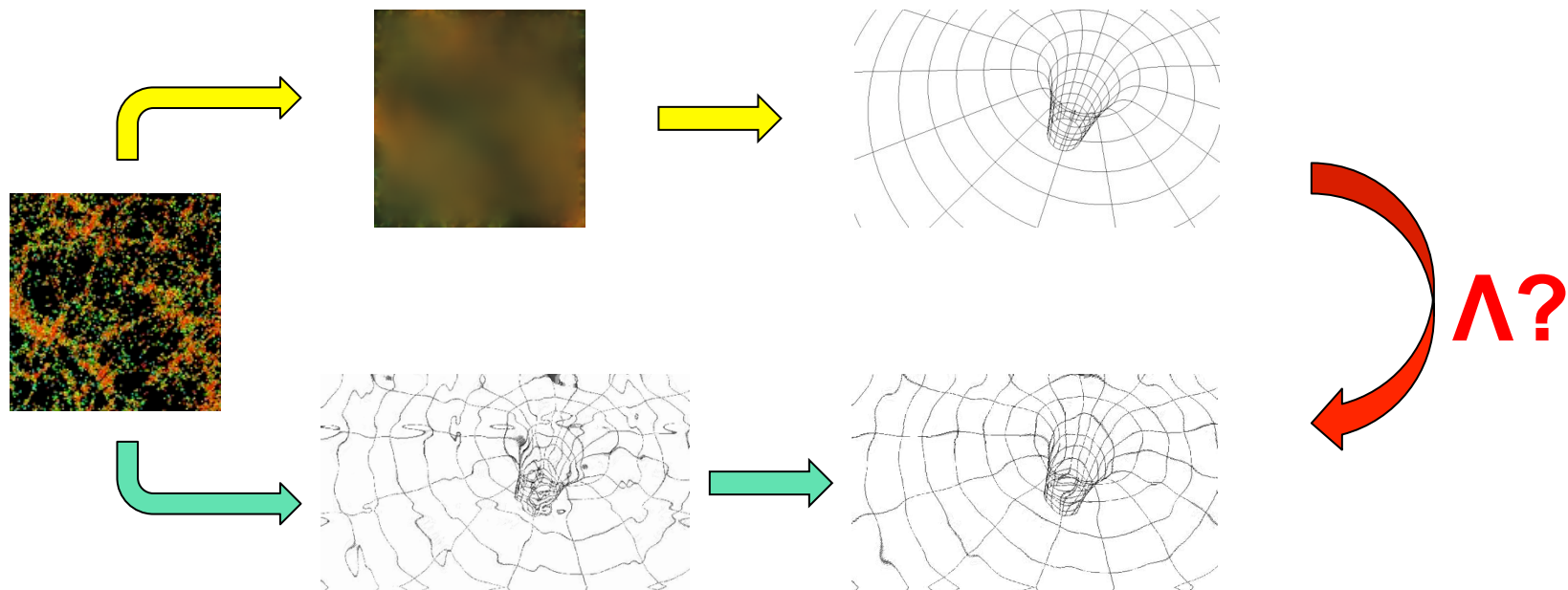
## Une bulle « locale » ?

- 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!**



## Une question de moyenne...? $\langle G [g] \rangle \neq G [\langle g \rangle]$

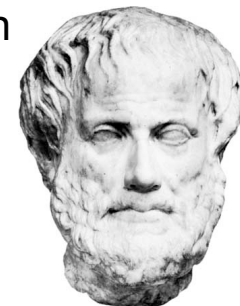
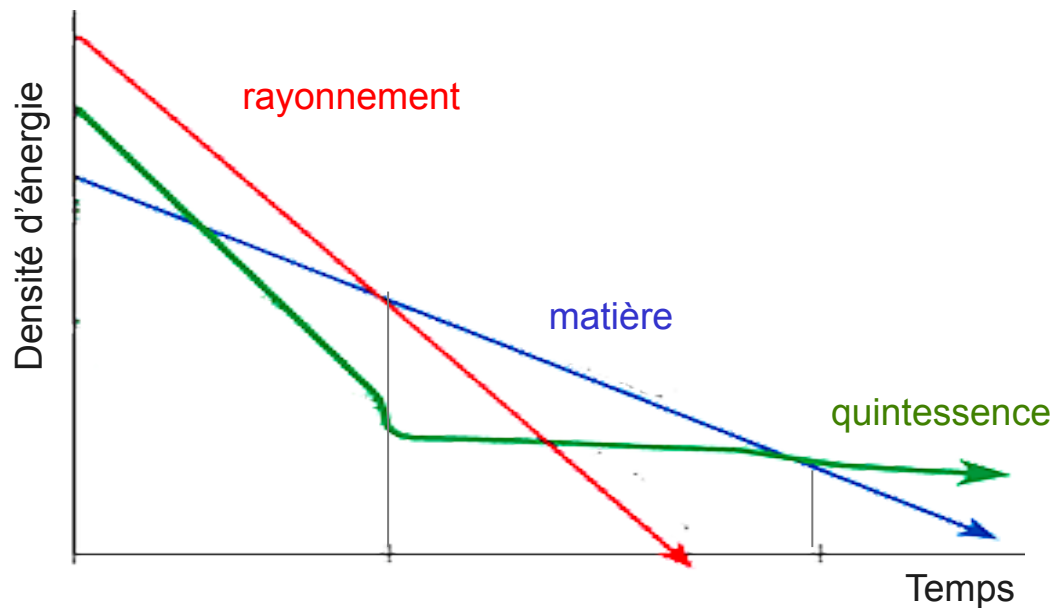
- L'équation d'Einstein a été résolue pour un univers homogène et isotrope, en calculant la géométrie (= la métrique  $g$ ) correspondante



- 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...**

# 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 si facile à réaliser... et le modèle n'a aucune autre justification



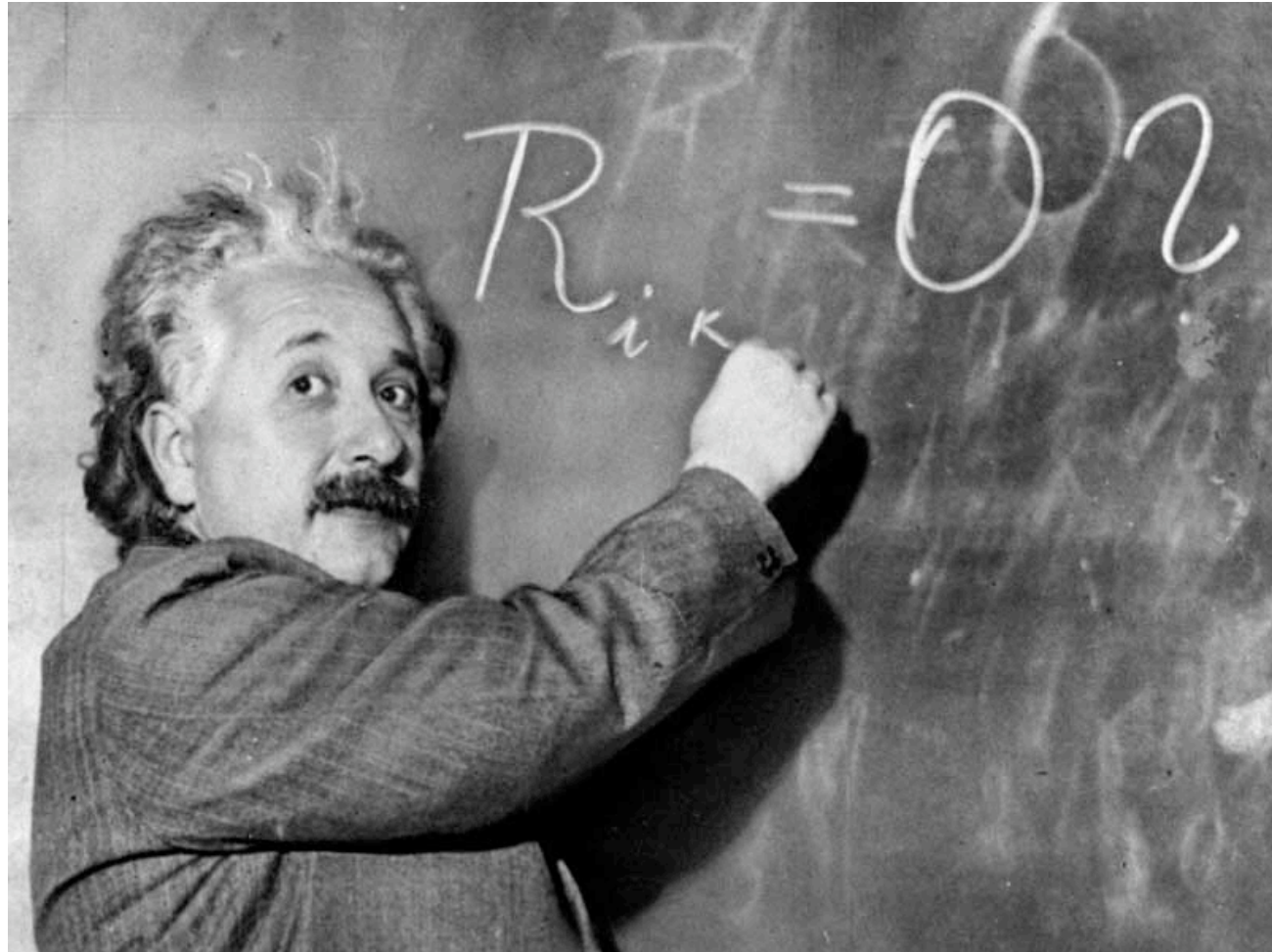
## Quintessence

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 ...

## 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  $g$

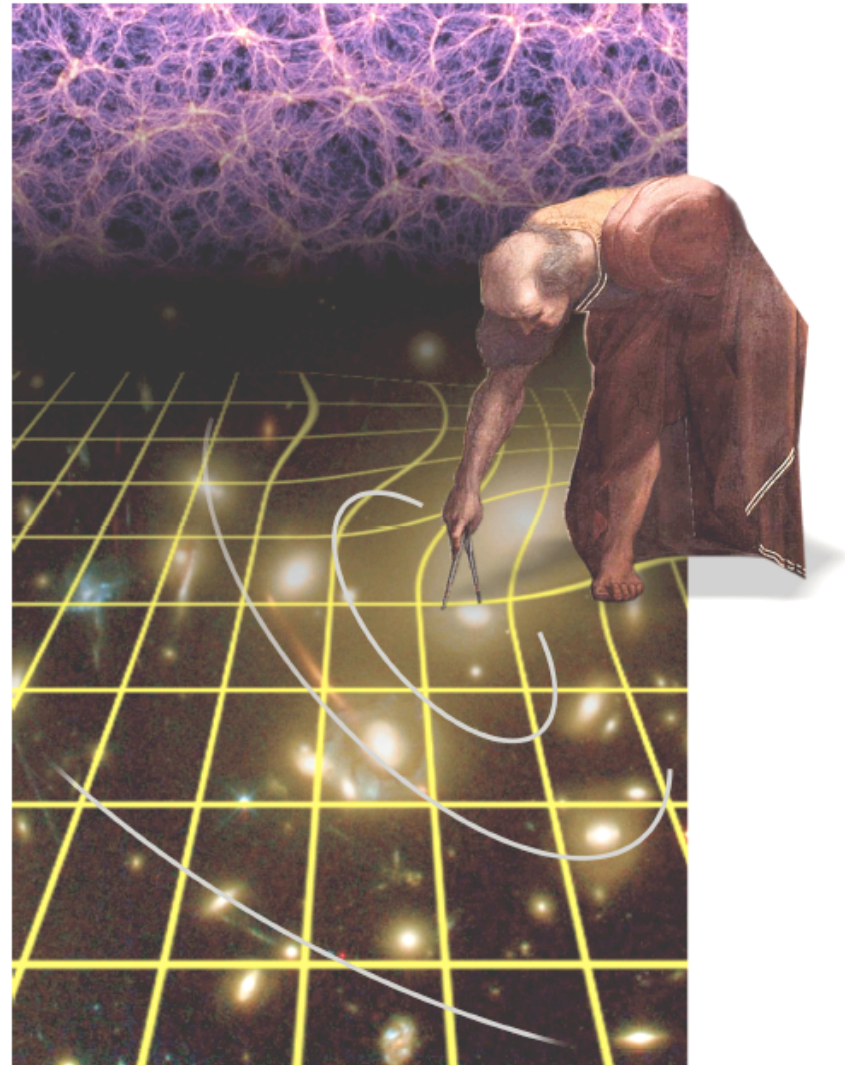
- Suggestion :

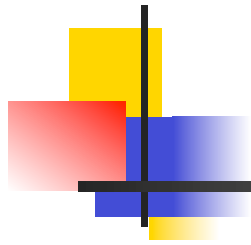
$$\mathcal{L} = f(R)$$

- 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 encore 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**

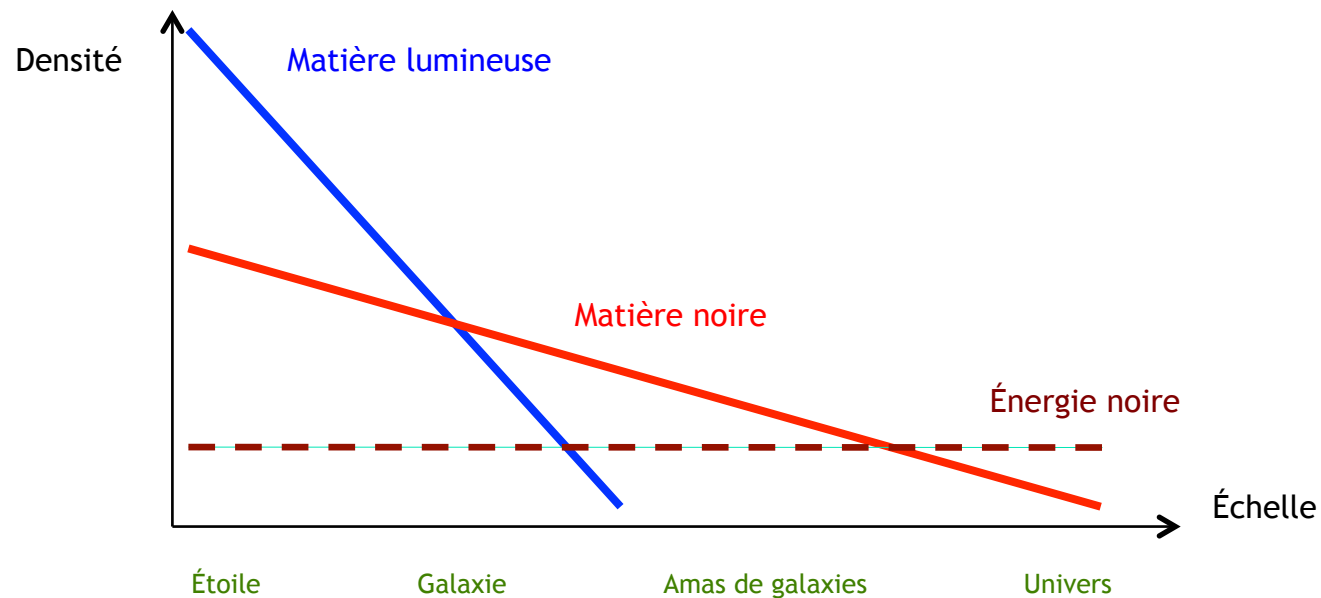
- dynamique confirmée
- émission X intense du gaz chaud
- distorsions gravitationnelles de la lumière (arcs)

- **Cosmologie du big bang**

- formation des galaxies
- supernovae
- fluctuations du CMB

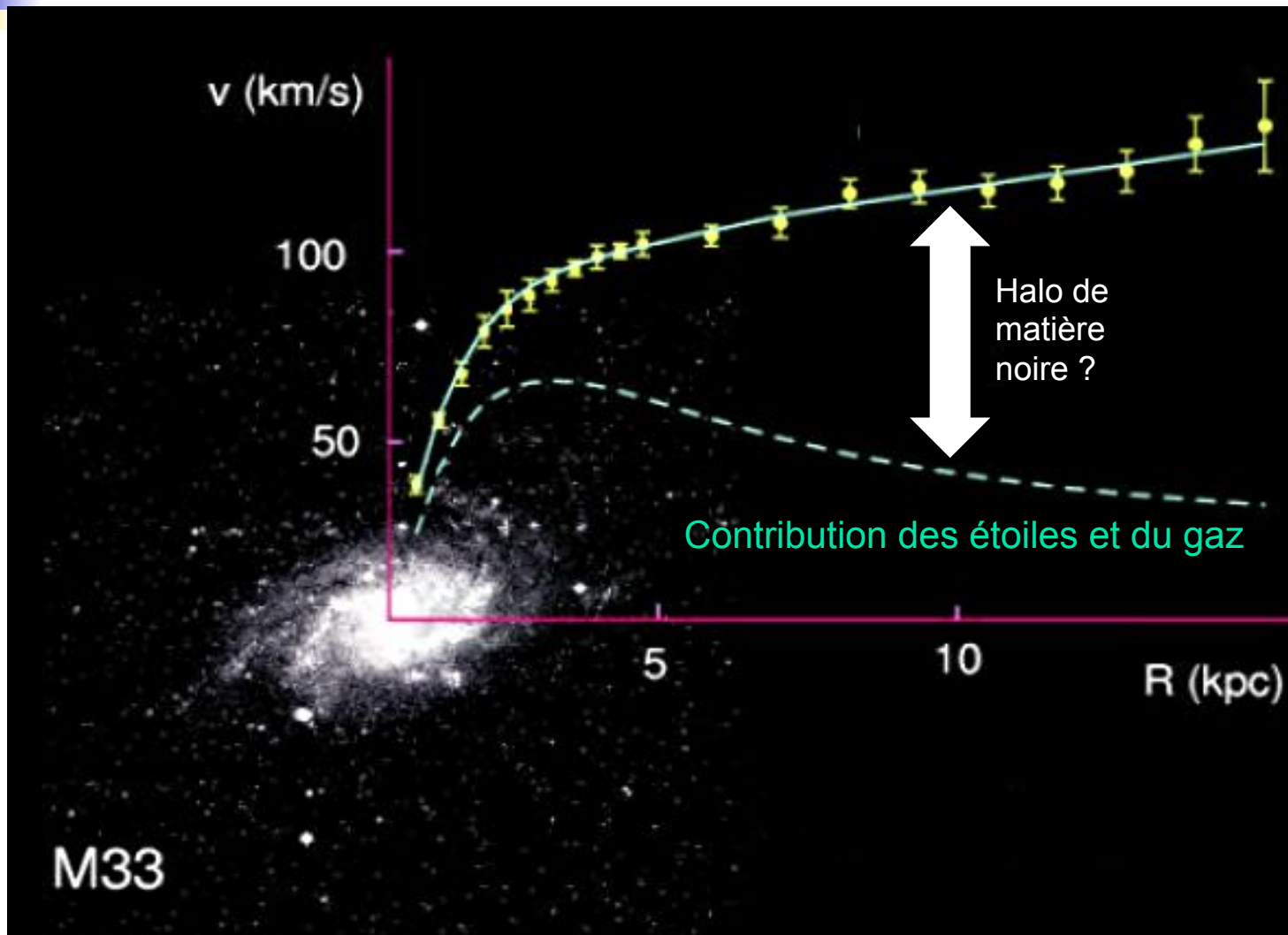
## Désaccord quantitatif mais aussi qualitatif

- 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

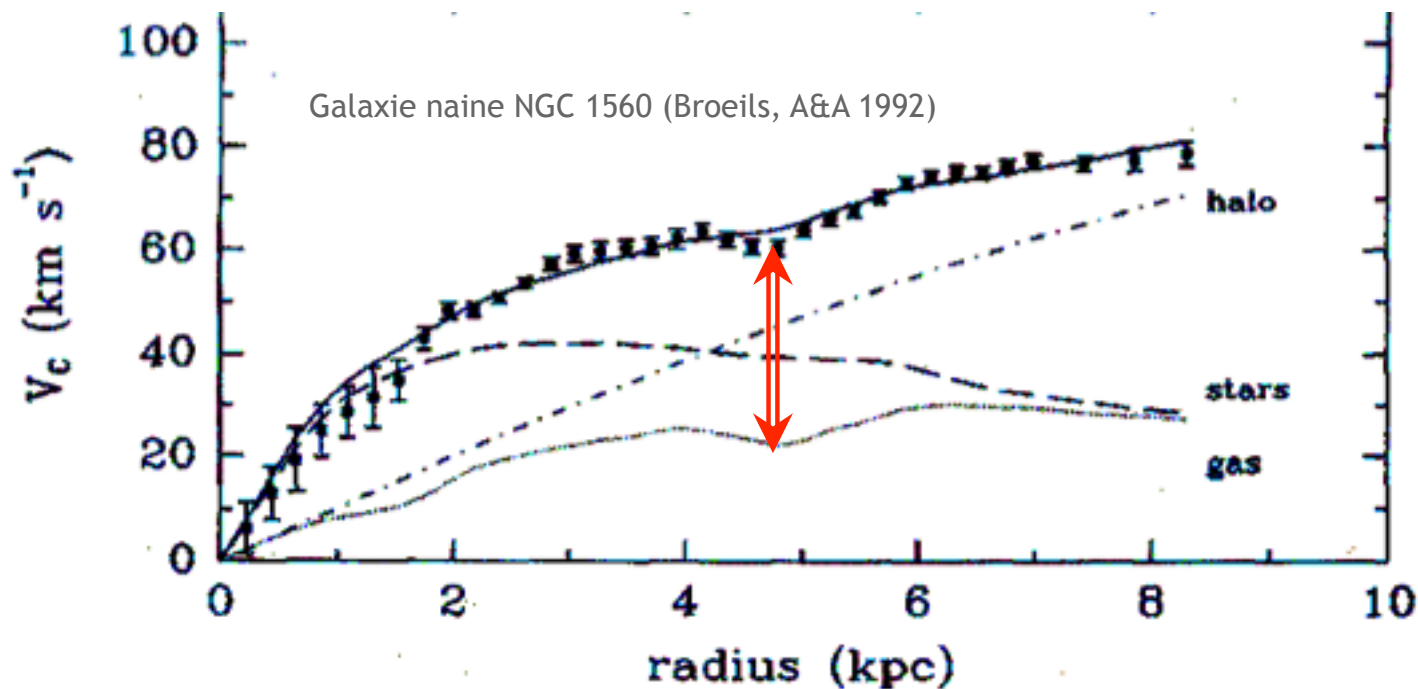
## → Courbes de rotation des galaxies spirales



# 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>

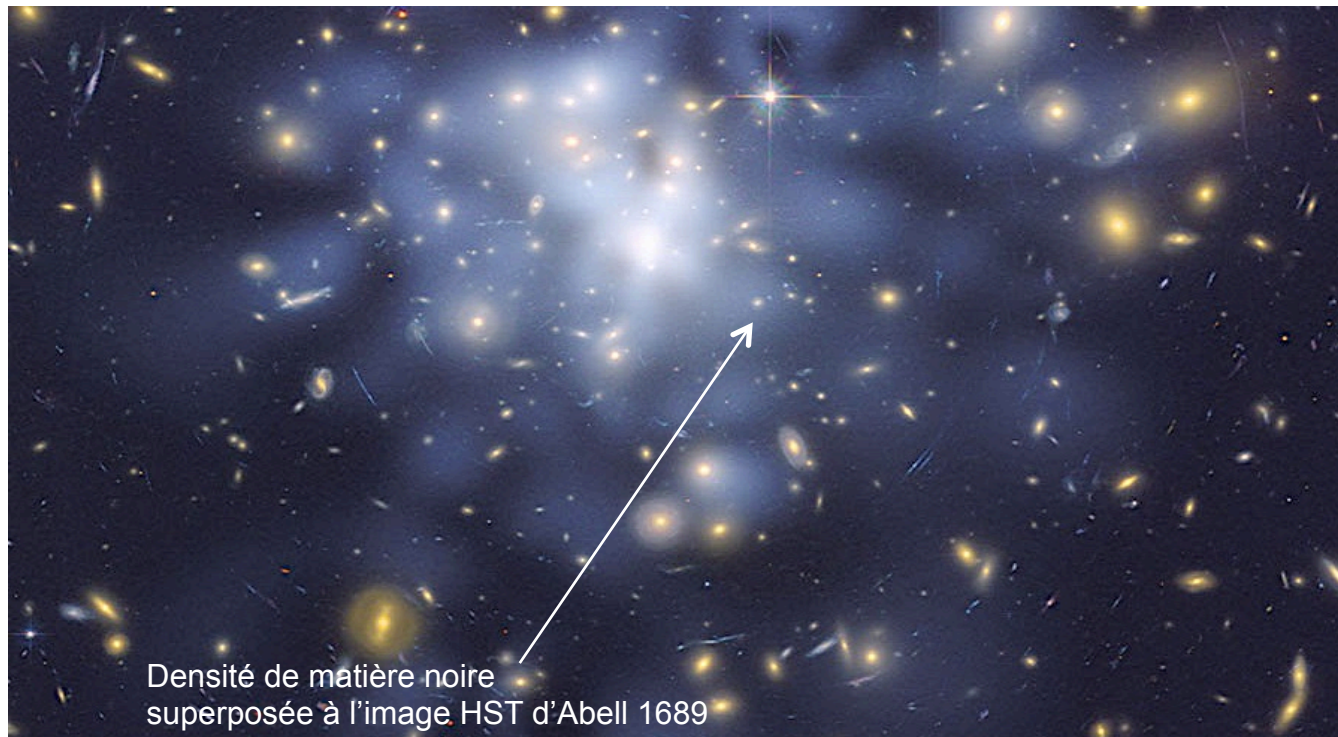




# Amas et matière noire

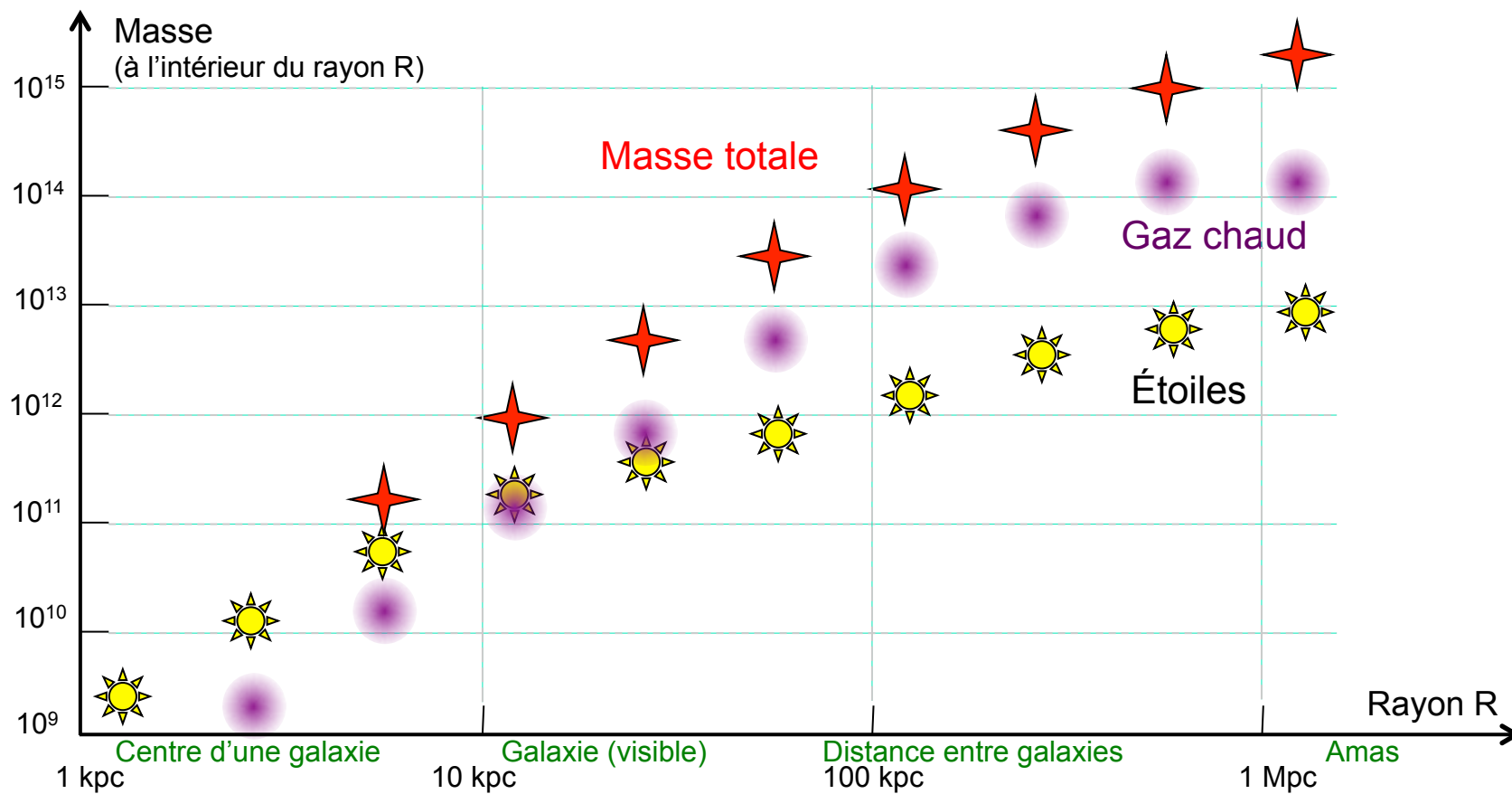


1. Dynamique des galaxies à l'intérieur d'un amas
2. Profil de densité et de température du gaz chaud émetteur de rayons X
3. Distorsions gravitationnelles (arcs et arclets)



# Selon la taille...

Bien plus de gaz que d'étoiles... ...et bien plus de matière noire que de gaz





# 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 :  $\delta T/T < 10^{-5}$ 
  - $\Rightarrow \delta\rho_B/\rho_B < 10^{-5}$  à  $z \sim 1100$  pour la matière ordinaire (baryons) couplée aux photons
  - $\Rightarrow \delta\rho_B/\rho_B < 10^{-2}$  à  $z \sim 0$
- Mais les amas de galaxies ont  $\delta\rho/\rho > 1$

## $\Rightarrow$ Nécessité de matière noire

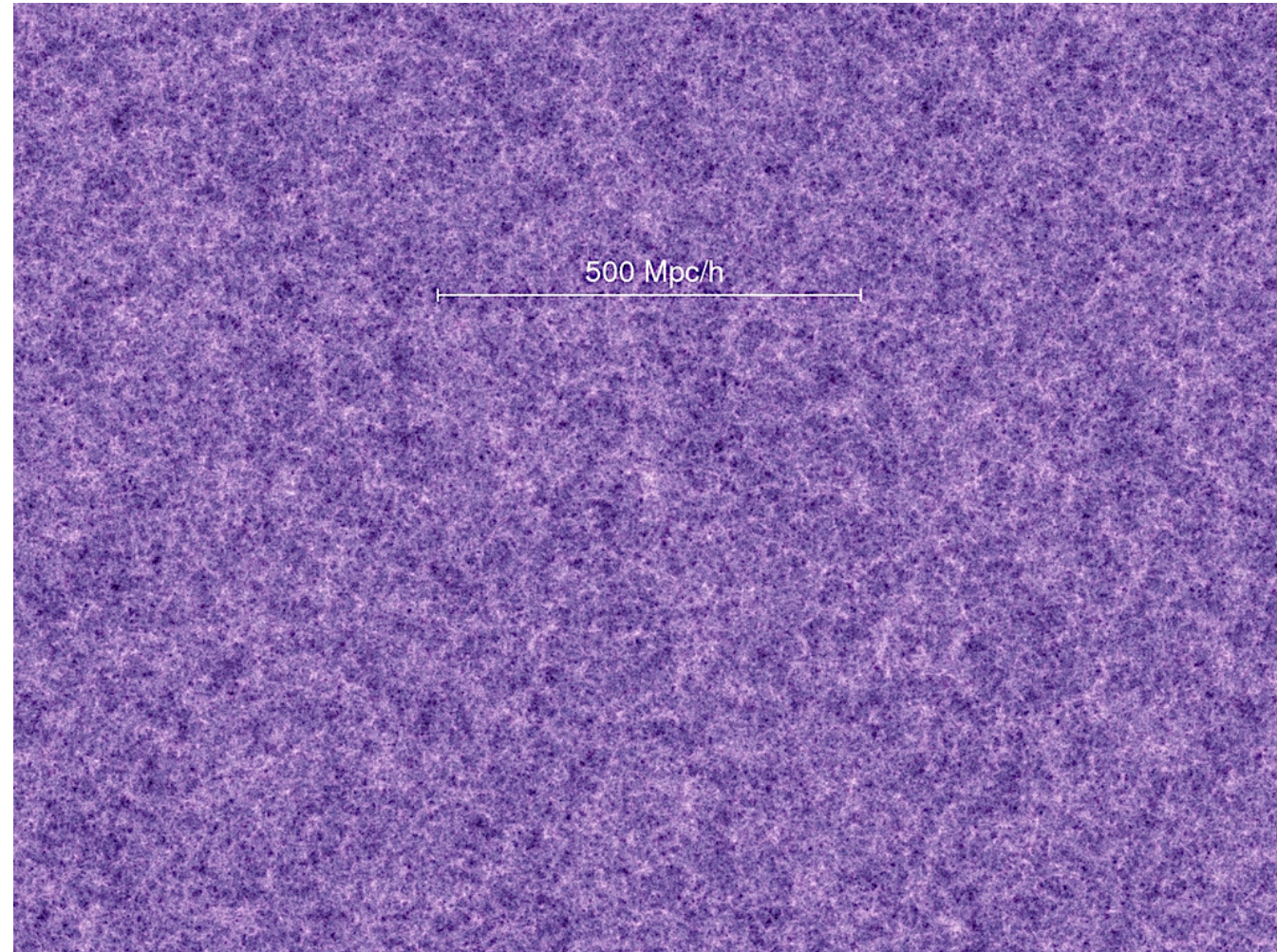
- La matière noire n'est pas couplée aux photons
- $\Rightarrow$  elle peut être plus concentrée que les baryons à  $z \sim 1100$  sans que cela apparaisse dans le CMB
- $\Rightarrow$  scénario
  - fluctuations initiales  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$  pour toutes les formes de matière
  - la matière noire augmente son **contraste de densité** dès  $z \sim 10^4$  ou  $10^5$
  - les baryons restent bloqués par la pression de rayonnement à  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$  jusqu'à la recombinaison
  - puis ils sont attirés par la matière noire





## Simulation numérique : matière noire (*Millenium* ©MPA Garching)

$z = 18,3$   
 $t = 210 \text{ Ma}$

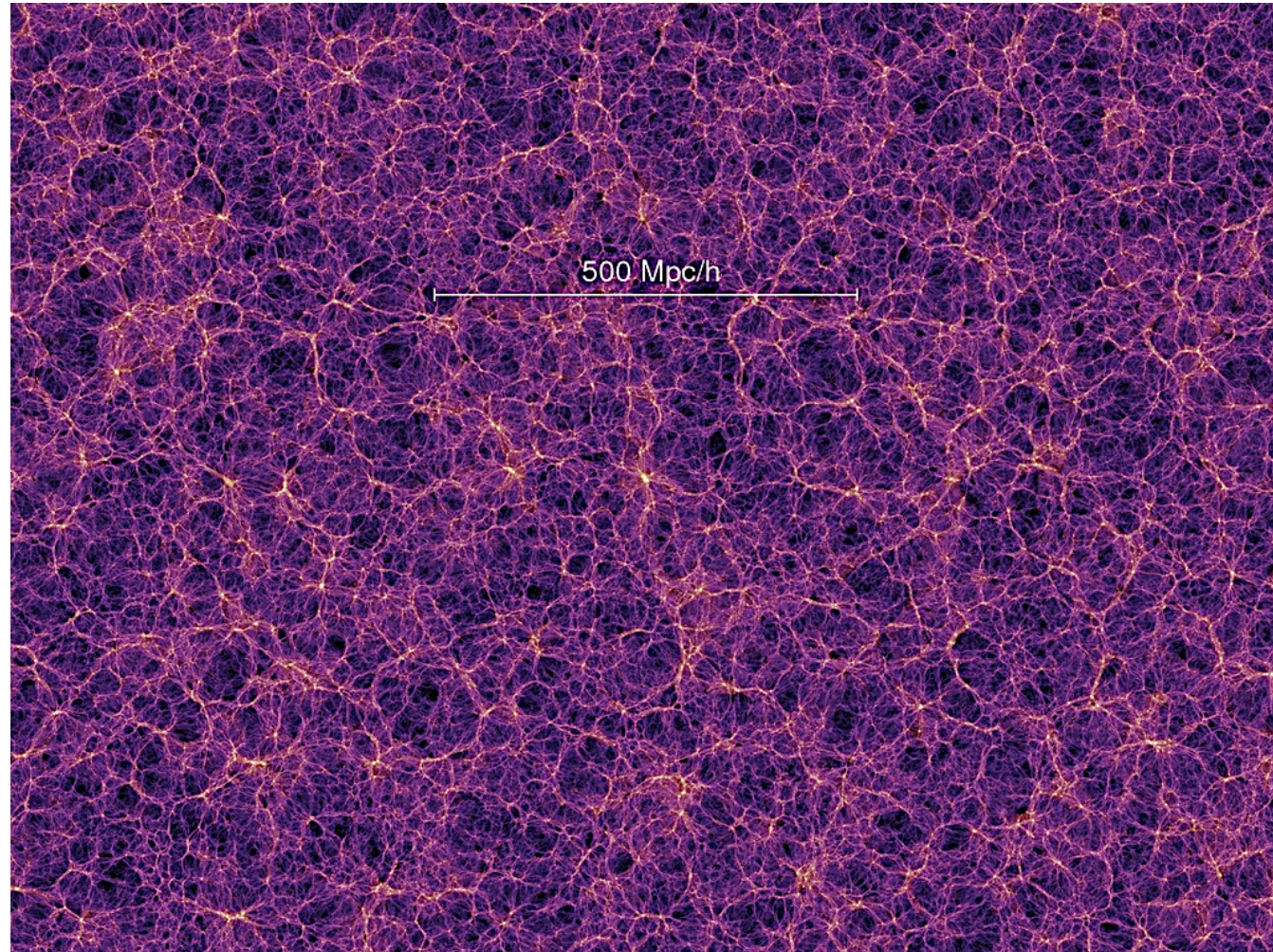






# Simulation numérique : matière noire (*Millenium* ©MPA Garching)

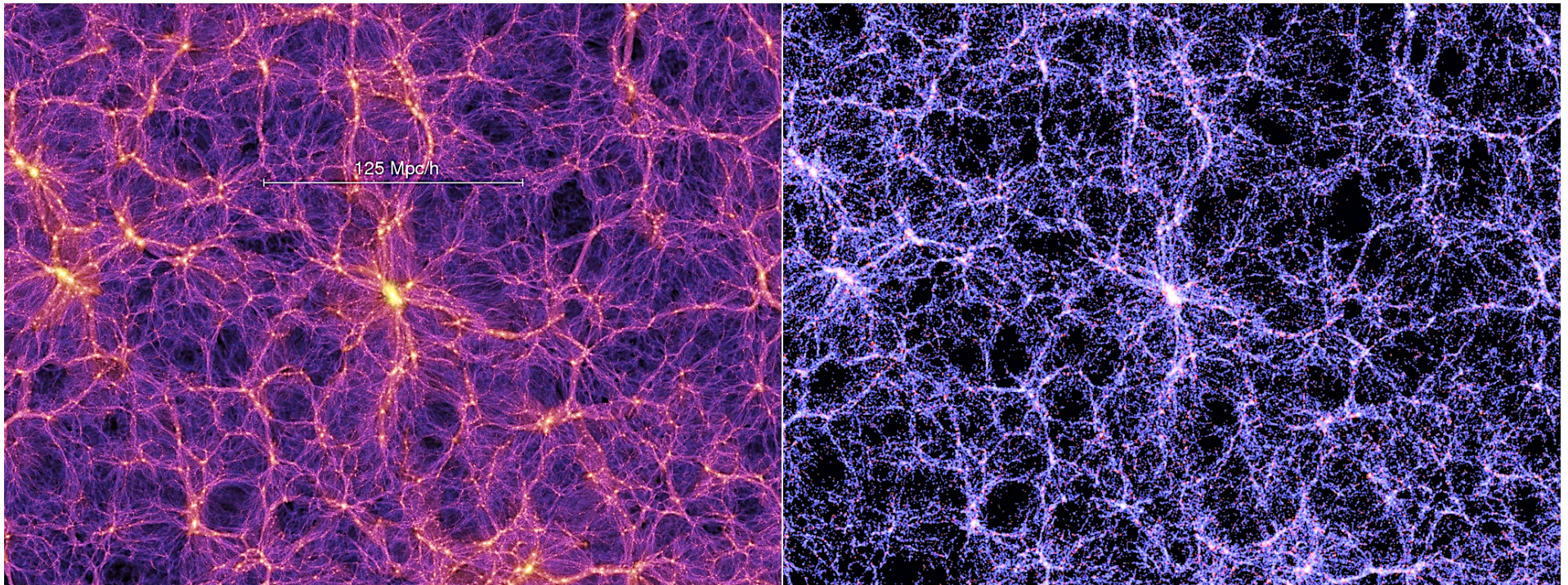
$z = 0$   
 $t = 13600 \text{ Ma}$

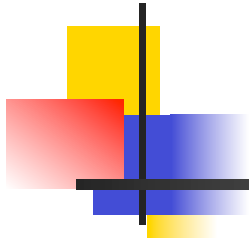






# Matière noire... matière lumineuse...





# **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
- }  $\Rightarrow \Omega_B \approx 0,04 \ll \Omega_{\text{matière}}$



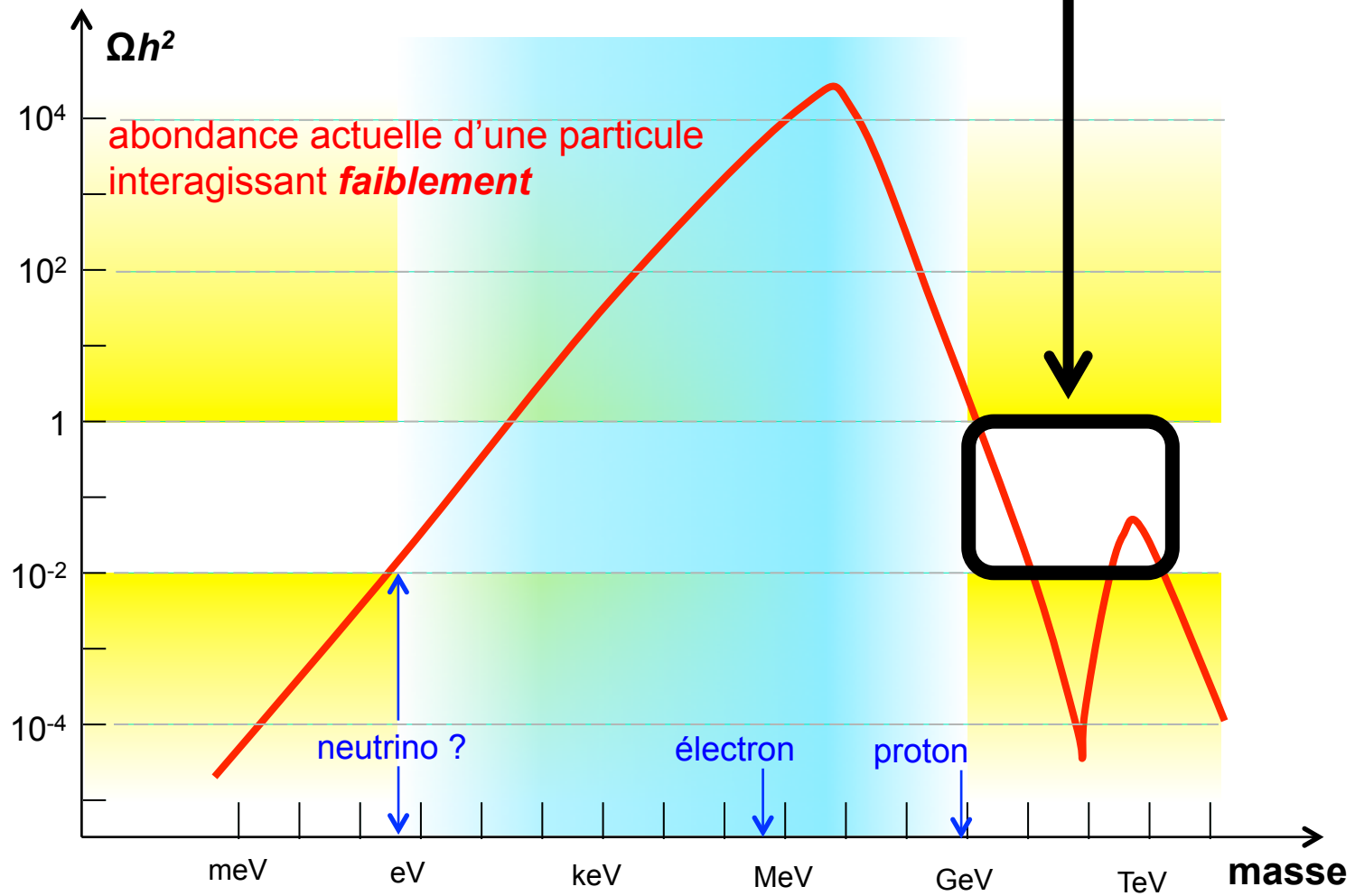
# De quoi est formée la matière noire?

- De matière « normale » mais obscure?
  - ~~poussières?~~
  - ~~planètes, astéroïdes?~~
  - ~~étoiles noires, brunes, blanches?~~
  - ~~trous noirs stellaires?~~
  - ~~trous noirs géants?~~
  
- ~~De neutrinos?~~
  
- Un nouveau type de particule élémentaire stable?
  - lourde, et donc rare?
  - autre chose?
    - axions?
    - wimpzillas?
    - pyrgons?
    - ...



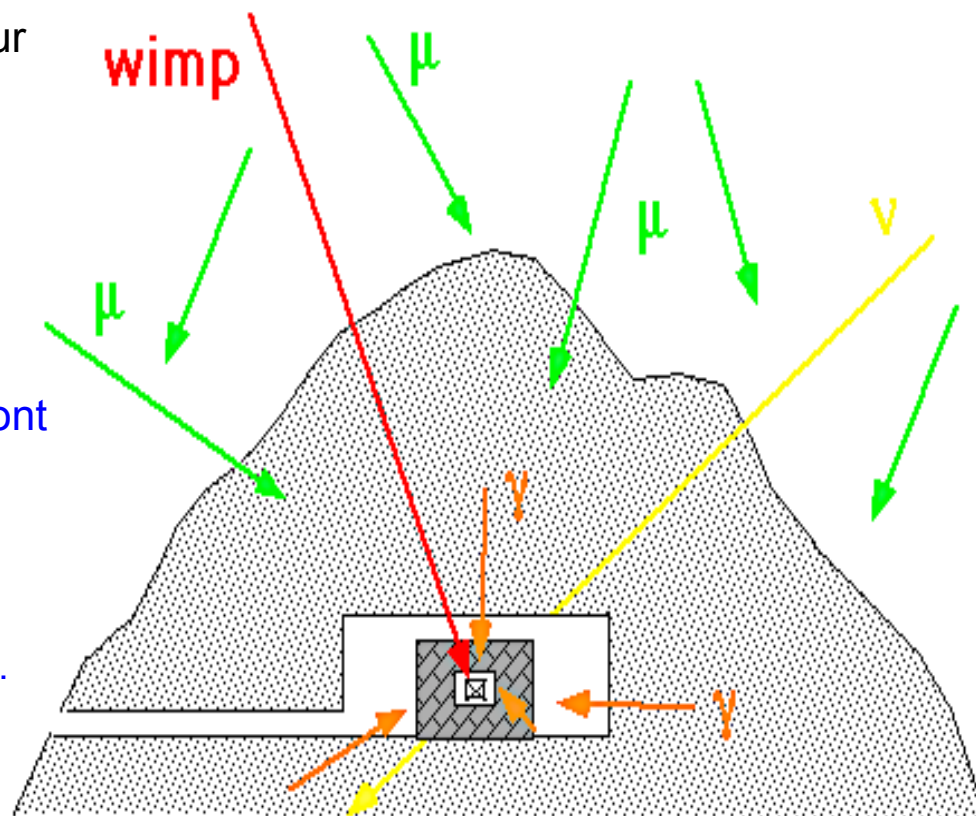
Mauviettes (wimps)

# Le « miracle » wimp ?

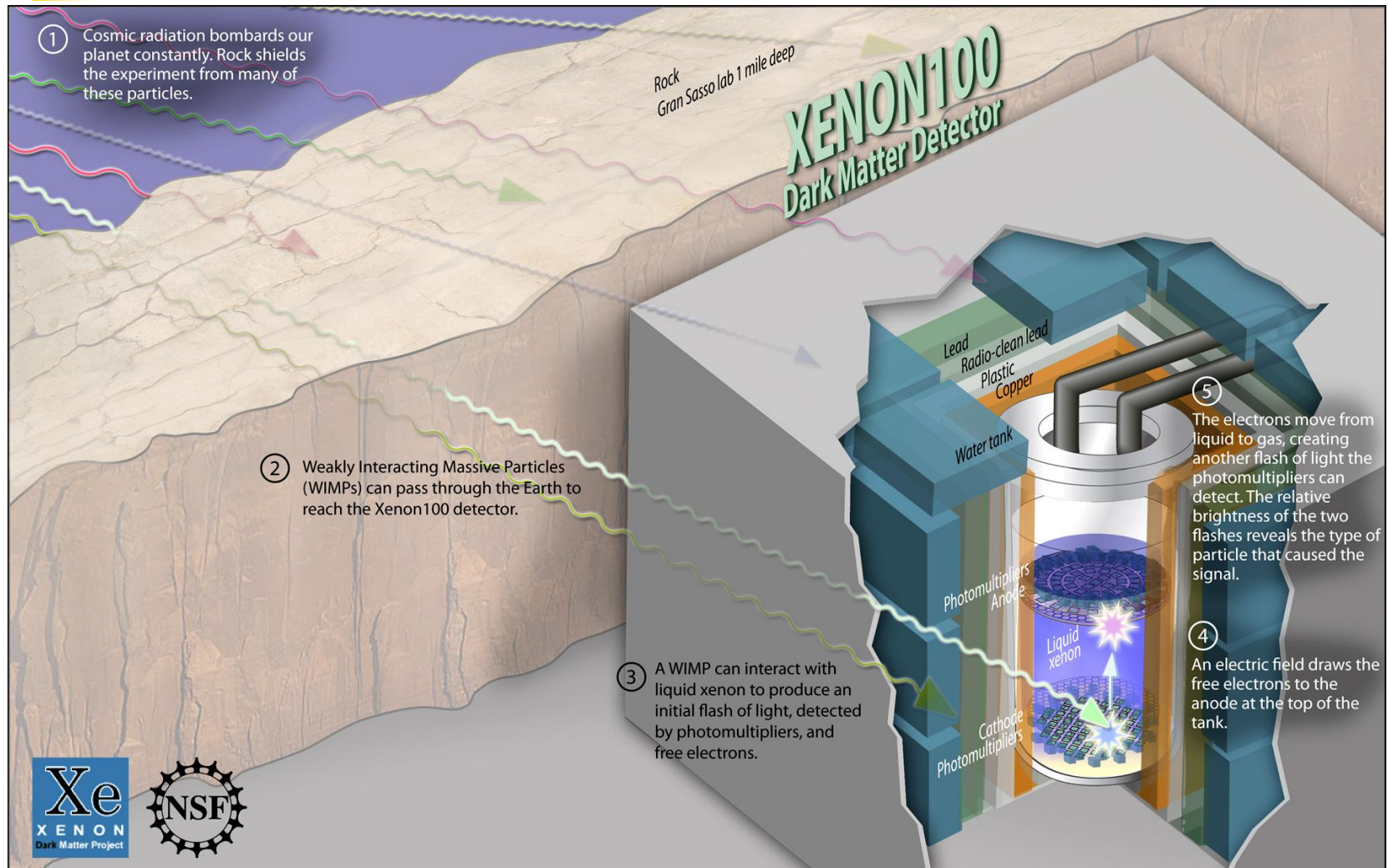


## Observer l'univers du fond d'un tunnel

- 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.....

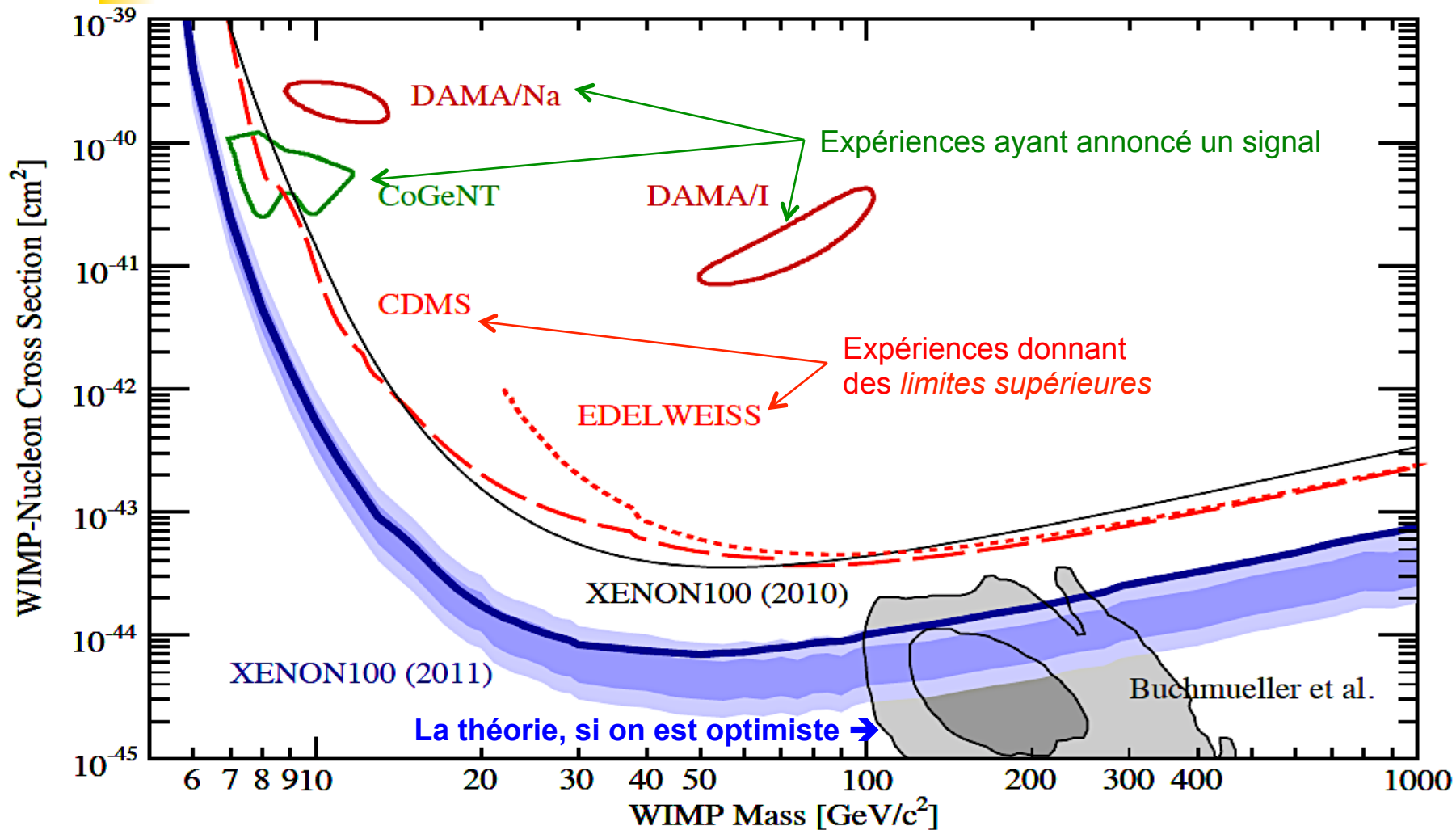


# Expérience Xénon 100 : 100 kg de xénon liquide



# Expérience Xenon-100

© Aprile et al. (avril 2011)





## Recherches indirectes

- Dans bien des modèles, WIMP et anti-WIMP, c'est pareil
- Si le halo est plein de WIMPs, ils doivent donc s'annihiler fréquemment
- Le résultat de ces annihilations pourrait être une paire de **rayons gamma**, « facile » à détecter du sol



Deux des quatre télescopes à rayons gamma de HESS, en Namibie

ou de l'espace  
(Integral, Fermi)

Ou des **neutrinos**, plus difficiles à détecter, mais des expériences sont en cours, au fond de la Méditerranée (**Antarès**) ou dans les glaces du pôle Sud (**Amanda**)

Résultat nul jusqu'ici

# 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





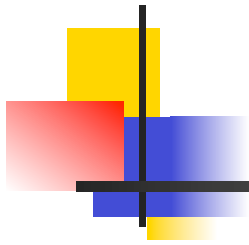
## Et pour conclure...

---

There are more things in heaven and earth, Horatio,  
Than are dreamt of in your philosophy.

*(Shakespeare, Hamlet 1-V)*





Merci de votre attention !

