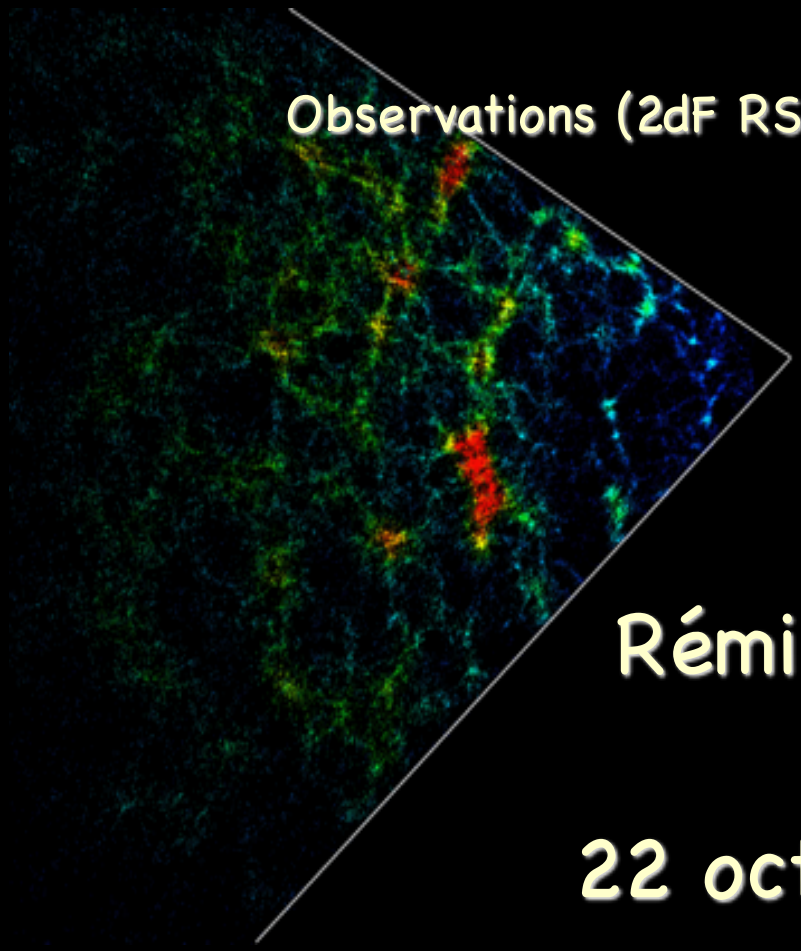
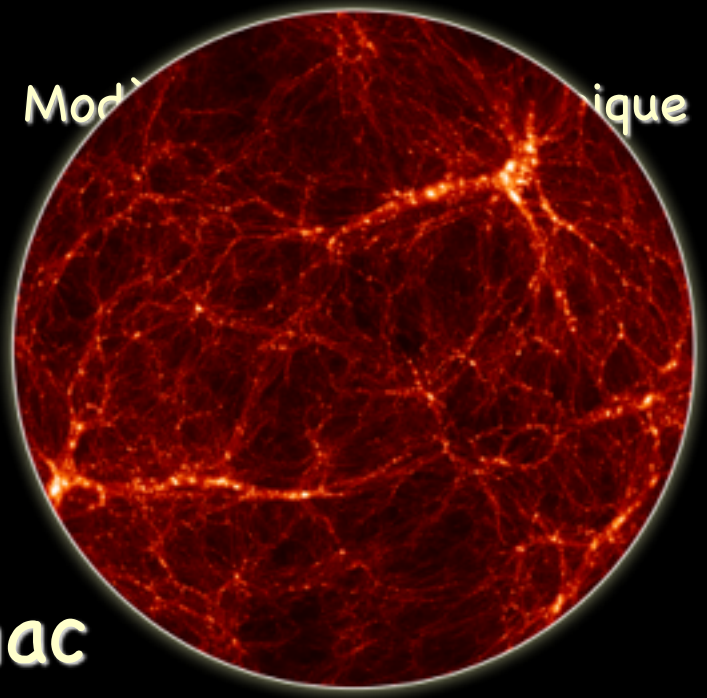
La construction de la structure à grande échelle de l'Univers





Rémi Cabanac

22 octobre 2016

Les bases de la connaissance scientifique…

1- Se poser des questions « scientifiques »

Les bases de la connaissance scientifique…

1- Se poser des questions « scientifiques »

2- Utiliser une bonne méthode

Phase 1 Hypothèse : le cerveau une machine à créer des idées (bonnes et moins bonnes).

Phase 2 vérification: observations ou expériences quantifiées, reproductibles et cadrées

Phase 3 → retour Phase 1

...

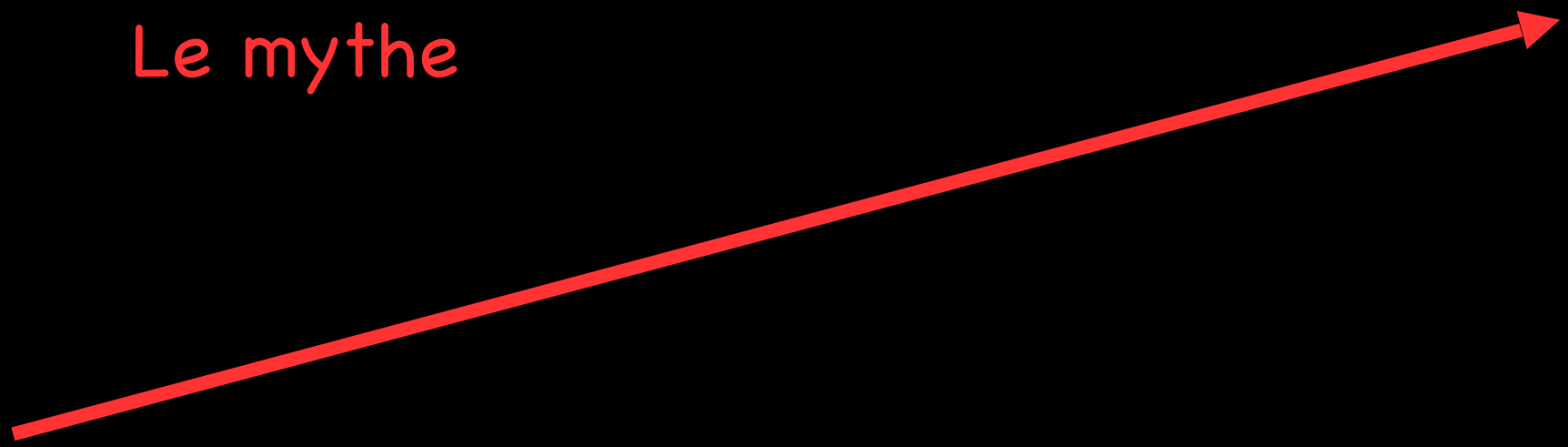
Méthode scientifique appliquée à l'astronomie :

Hypothèse : La Terre est plate
Observation : localement, c'est vrai ! Mais à grande échelle, les ombres varient en fonction de la latitude.
Hypothèse : La terre est ronde
Observations : ca marche jusqu'à un certain point.
Etc ...

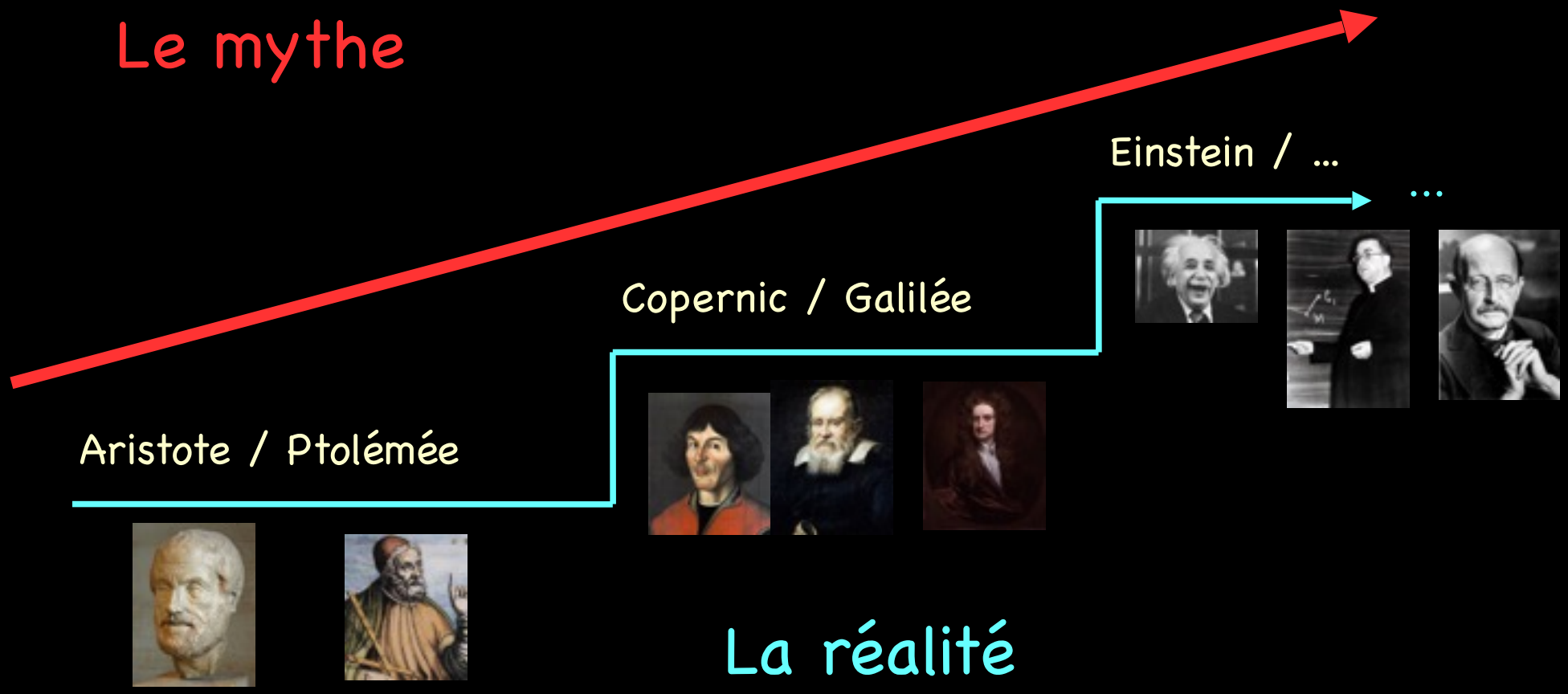
Hypothèse : Le ciel et Soleil tournent en cercle autour de la terre...
Observation : OK, mais orbites compliquées à calculer
Hypothèse : La terre et les planètes tournent en cercle autour du Soleil
Observation : OK, ça simplifie tout, mais on mesure des écarts
Hypothèse : les orbites terrestres sont des ellipses
...

En réalité la science progresse …

Le mythe



En réalité la science progresse …
… par grands sauts (révolutions, Kuhn)



Histoire courte de l'univers :

- Une force dominante sur 4 : La gravitation

- Une complexification progressive :

émergence de :

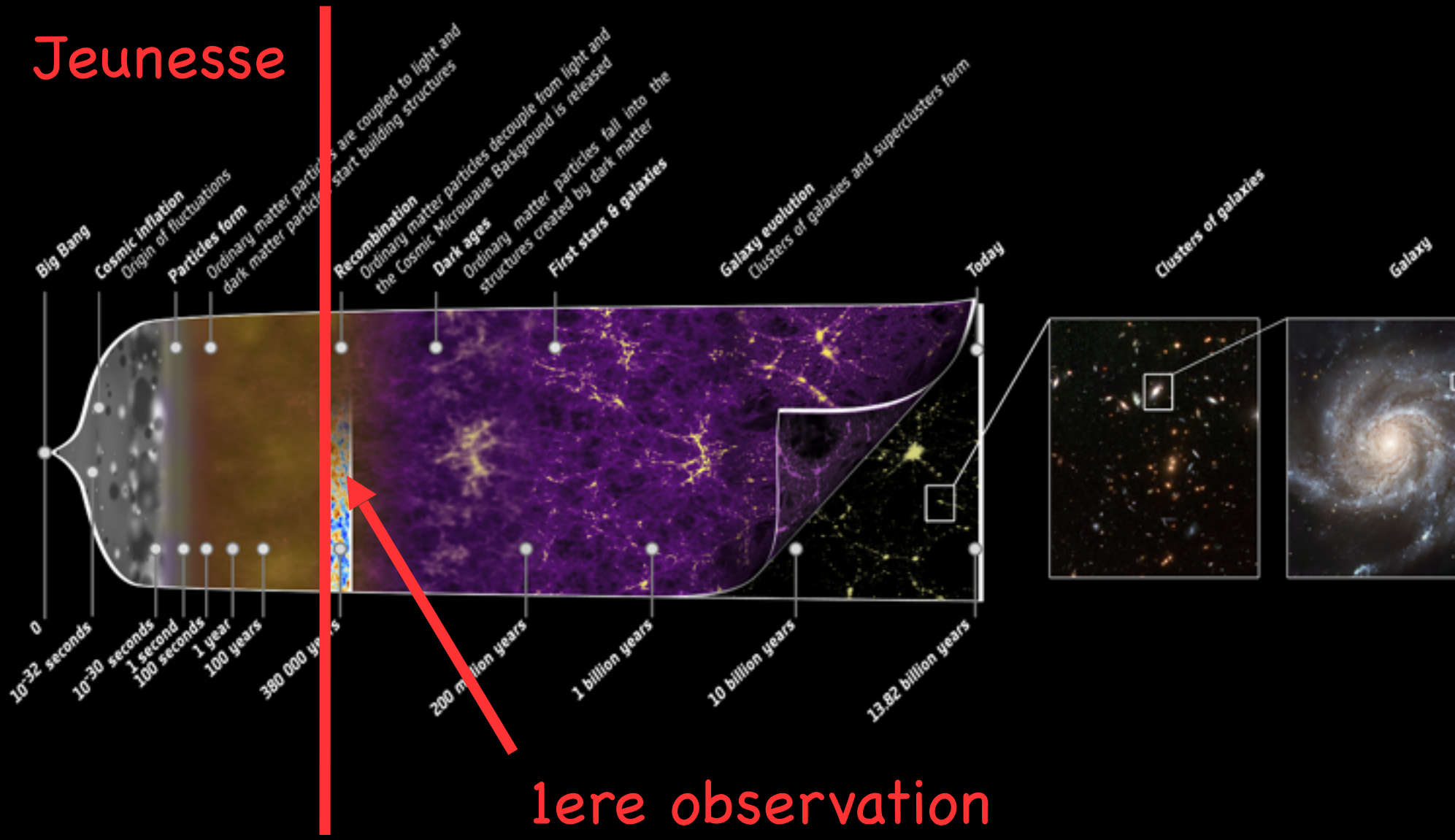
- structures dans l'espace-temps
- matière solide
- liquide, molécules
- chimie, vie...

Les observations nous montrent que notre univers devient de plus en plus contrasté avec l'âge.

Les observations nous montrent que notre univers devient de plus en plus contrasté avec l'âge.

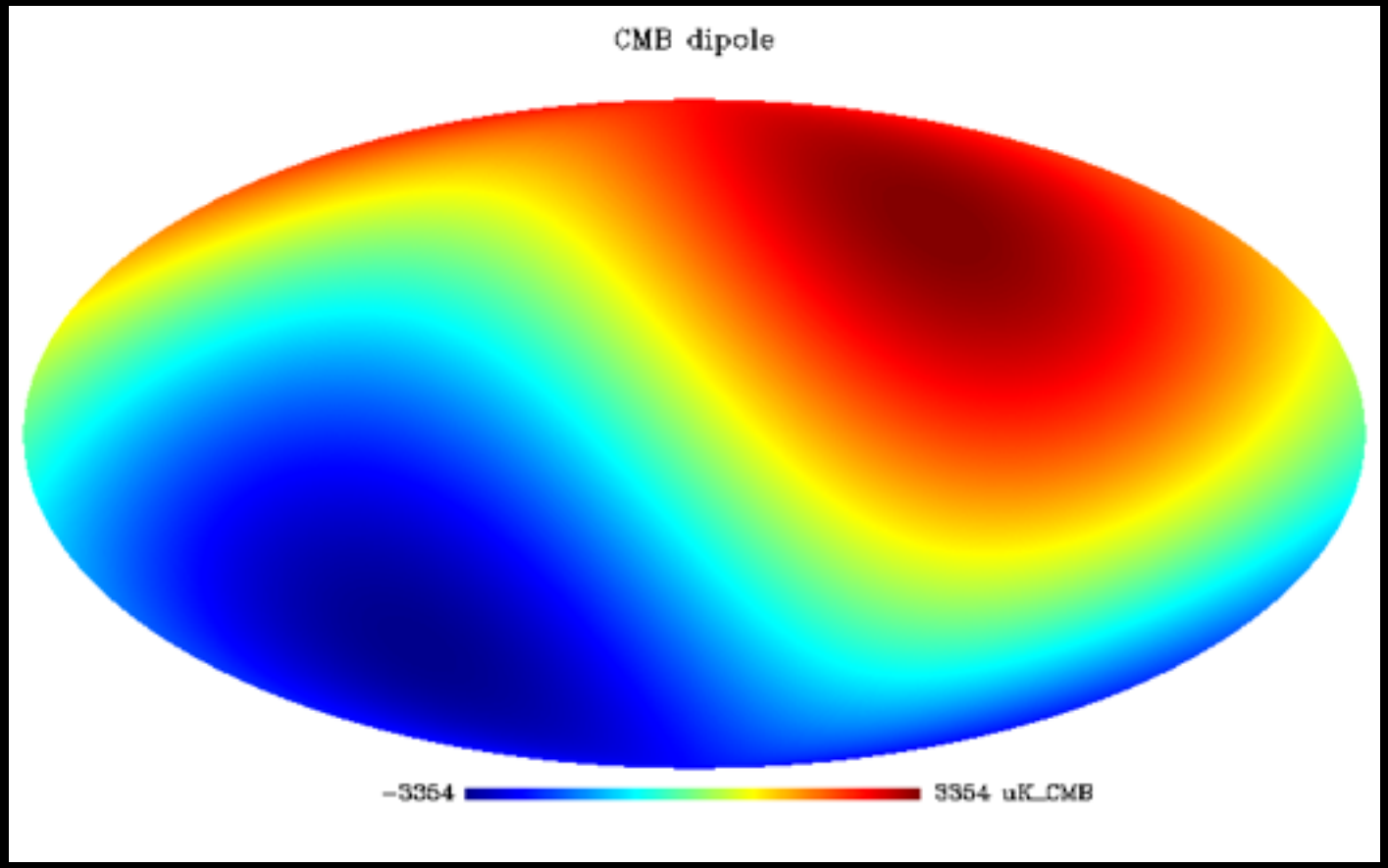
Voyons d'abord à quoi ressemble l'univers observé très lointain (et donc très jeune)

Histoire courte : Une jeunesse chaude et turbulente...



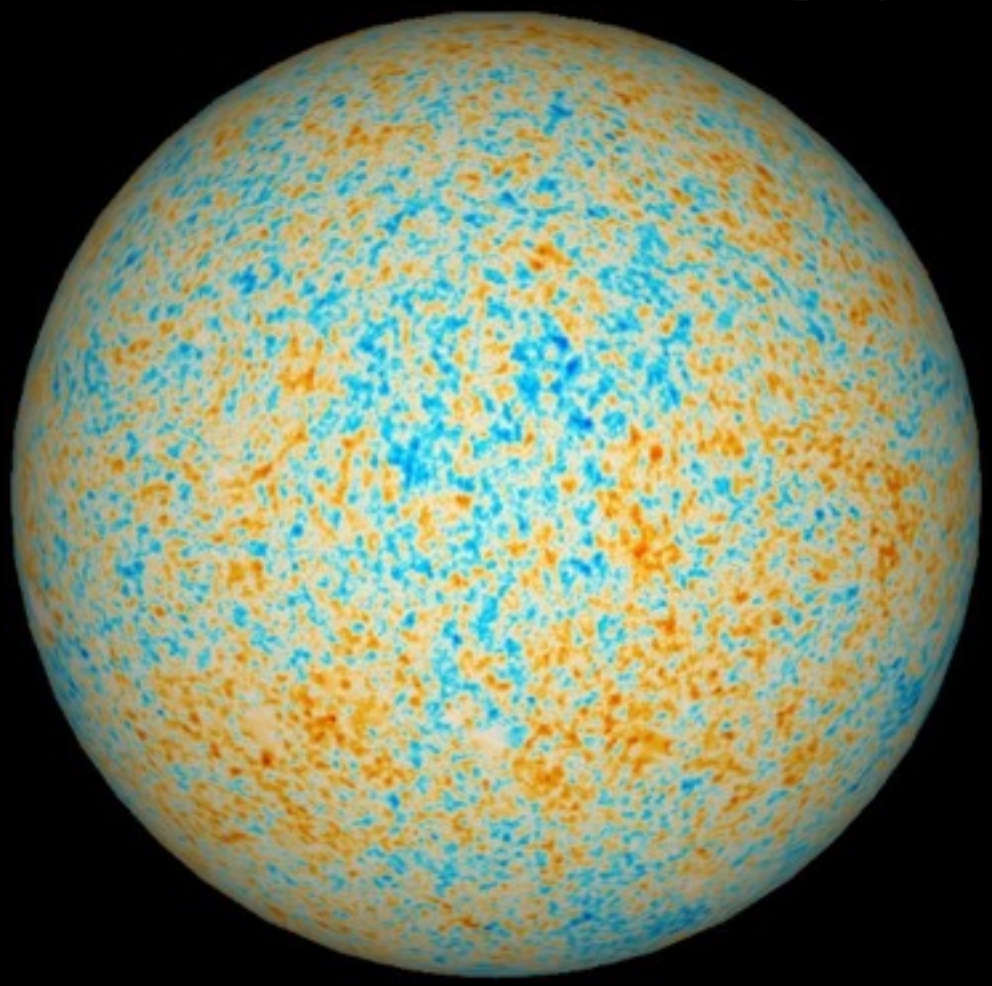
Première observation : Le fonds de rayonnement cosmologique…

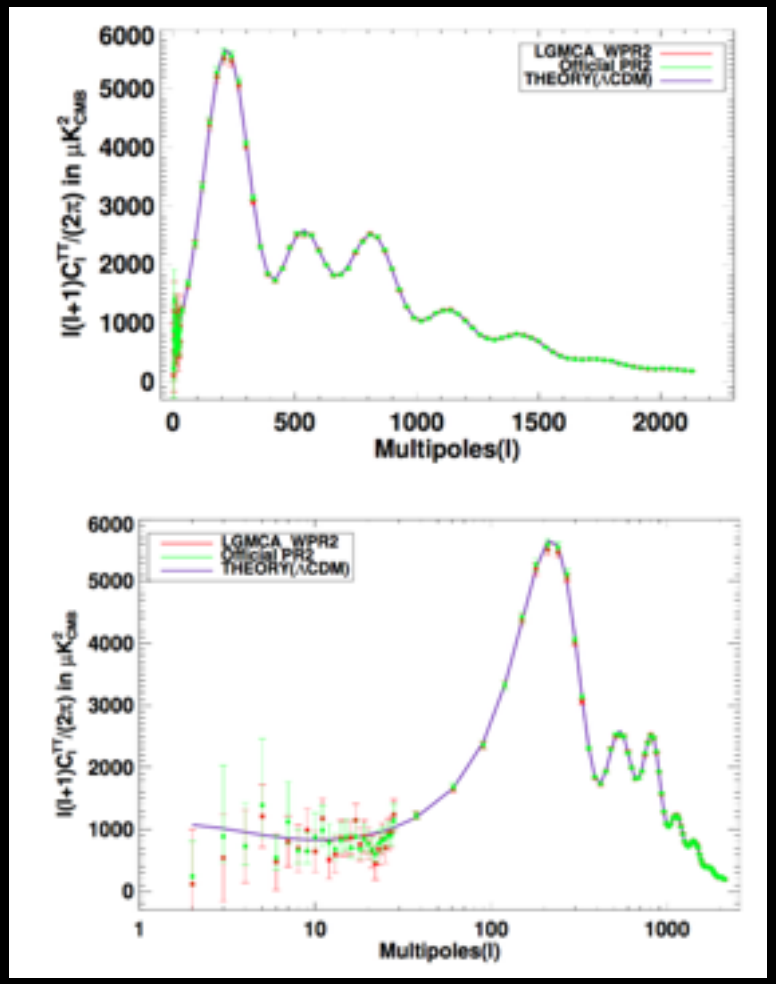
Première observation : Le fonds de rayonnement cosmologique…



Sur l'image brute, on ne voit que l'empreinte de la vitesse de la Terre (galaxie) par rapport au rayonnement de fonds cosmologique (effet doppler-Fizeau)

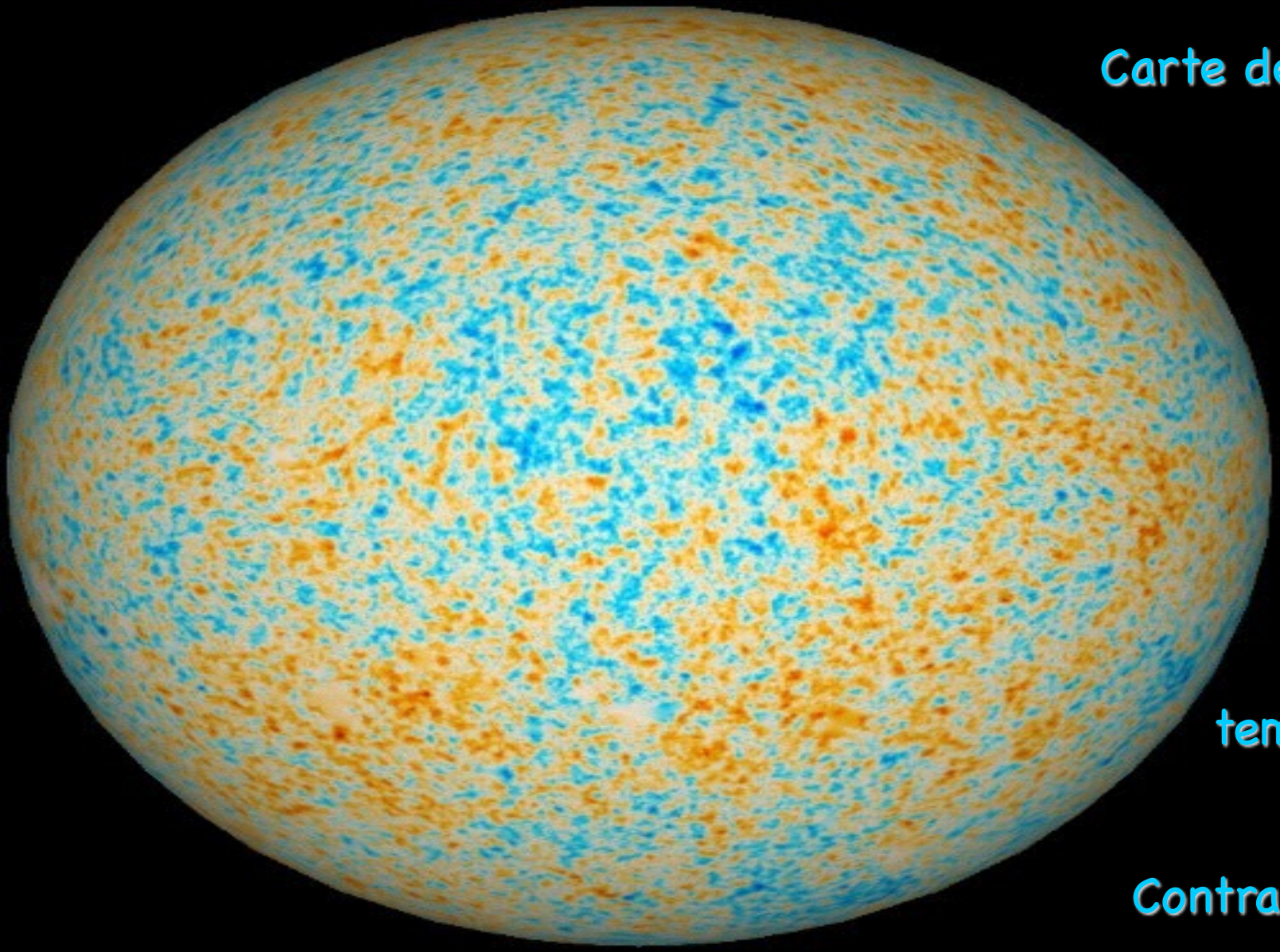
Première observation : Le fonds de rayonnement cosmologique…





- Observation par de nombreux satellites
- Interprétation très fine

Première observation : Le fonds de rayonnement cosmologique…



Carte de température

On relie la température à la masse

Contraste ≈ 1/10000

Le contraste de densité

Effet de la gravitation…

… Contraste de densité croissant

Première observation : Le fonds de rayonnement cosmologique…

Carte de température

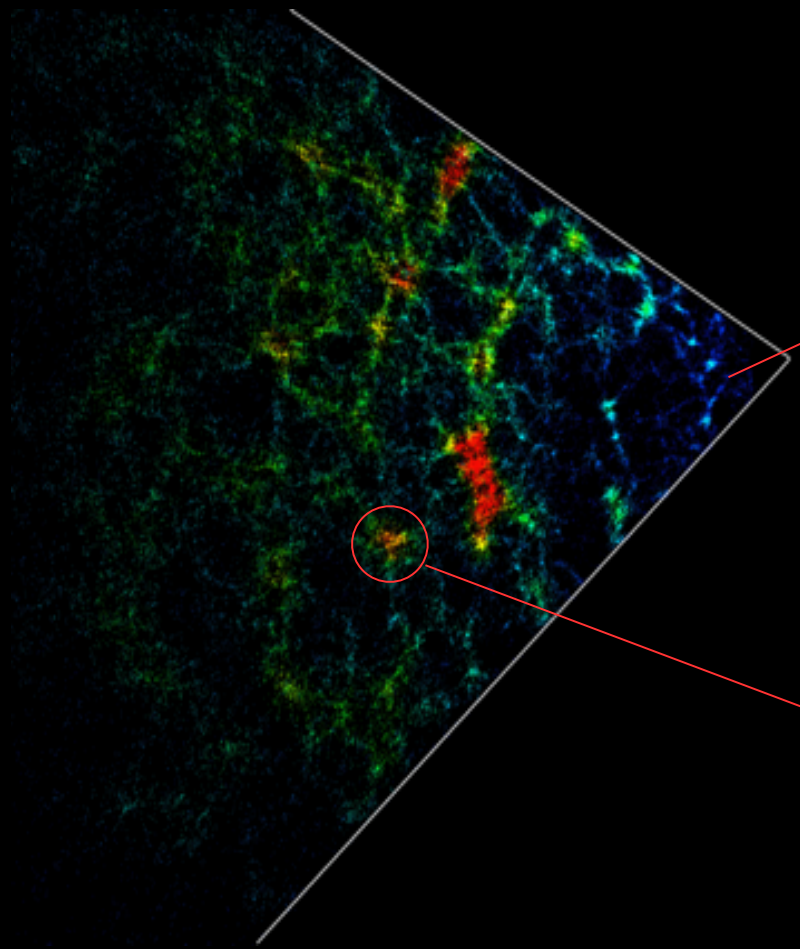
L'univers jeune était extraordinairement homogène

On relie la température à la masse

Contraste ≈ 1/10000

Le contraste de densité de l'univers aujourd'hui...

Aujourd'hui : la matière s'organise en gigantesques structures



galaxies

Contraste ≈ 1000

Amas de galaxies

Le contraste de densité de l'univers

Aujourd'hui :

$\Delta\rho/\rho \approx 1000$

Au début de l'univers

$\Delta\rho/\rho \approx 1/10000$

Contraste de densité croissant (X 10 millions)

Le contraste de densité de l'univers :

Au début de l'univers : $\Delta\rho/\rho \approx 1/10000$

Aujourd'hui : $\Delta\rho/\rho \approx 1000$

Age de l'univers : 13,7 milliards d'années

L'effet de la gravitation doit pouvoir expliquer que l'univers a augmenté son contraste de densité de 7 ordres de grandeur (X 10 millions) !

Les modèles d'évolution de l'univers

Expériences par la pensée : les simulations numériques (Spergel, Tissier, etc.) des grandes structures

- On utilise les supercalculateurs pour tenter de reproduire l'univers observable en introduisant les lois physiques, les conditions initiales.

Les modèles d'évolution de l'univers

Les modèles d'évolution de l'univers

Expériences par la pensée : les simulations numériques (Spergel, Tissier, etc.) des grandes structures

- Les modèles simples ne fonctionnent pas : Les galaxies et les amas de galaxies ne peuvent pas exister dans l'univers !

Les modèles d'évolution de l'univers

Expériences par la pensée : les simulations numériques (Spergel, Tissier, etc.) des grandes structures

- Les modèles simples ne fonctionnent pas : Les galaxies et les amas de galaxies ne peuvent pas exister dans l'univers !
- On doit ajouter des ingrédients : la matière sombre et l'énergie sombre
- OU
- On doit modifier la loi de la gravitation

Matière sombre? Energie sombre? Pourquoi?

Matière sombre: accélére l'effet de la gravitation, donc la vitesse de formation des galaxies et grandes structures

Energie sombre: elle dilate l'espace-temps, augmente l'âge de l'univers, donne davantage de temps aux structures pour se former

Matière sombre ?

Energie sombre ?

Et les observations ?

Matière sombre ?

MATIERE SOMBRE

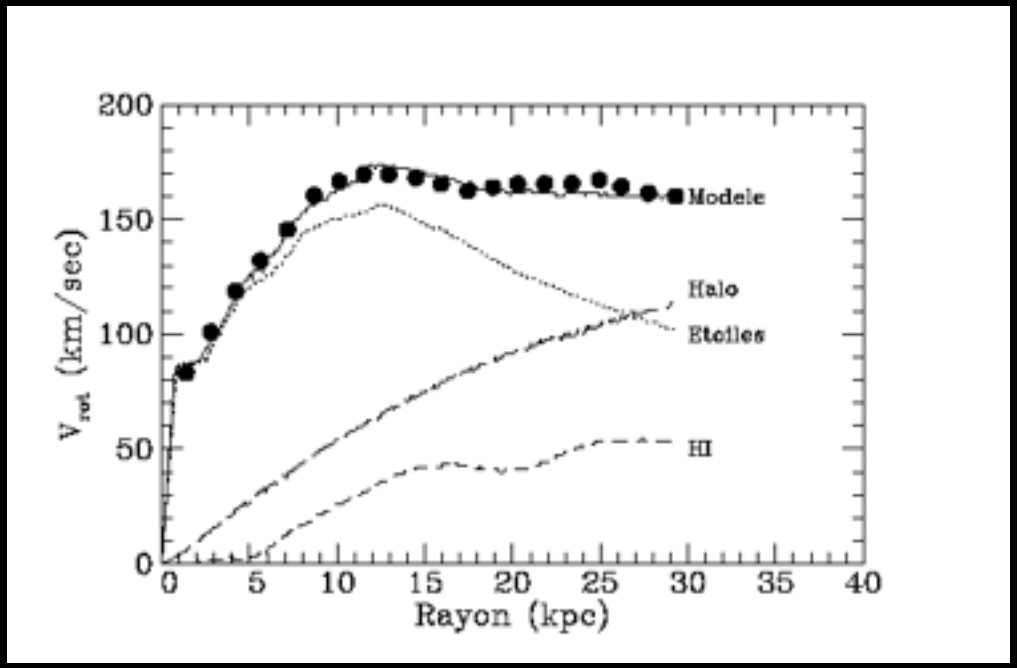
- Observations et inférences historiques (Zwicky 1930, Rubin 1950)
  - La rotation des galaxies spirales
  - La dynamique des galaxies dans les amas

MATIERE SOMBRE

- Observations et inférences historiques (Zwicky 1933, Rubin 1950)
  - La rotation des galaxies spirales
  - La dynamique des galaxies dans les amas

Matière sombre dans les galaxies

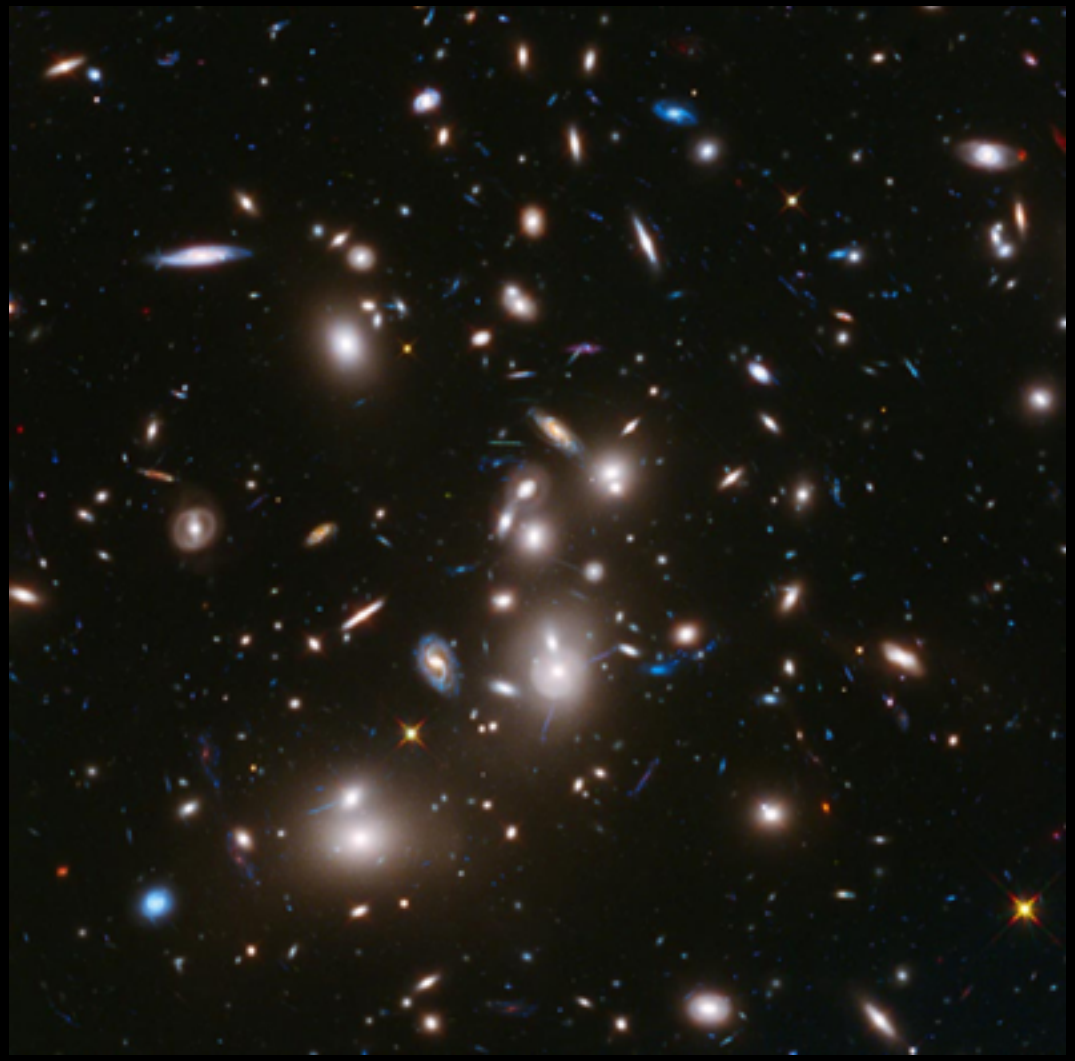
NGC 6946 (10 million a.-l.)



MATIERE SOMBRE

- Observations et inférences historiques (Zwicky 1933, Rubin 1950)
  - La rotation des galaxies spirales
  - La dynamique des galaxies dans les amas

Matière sombre dans les amas



Zwicky (1933)

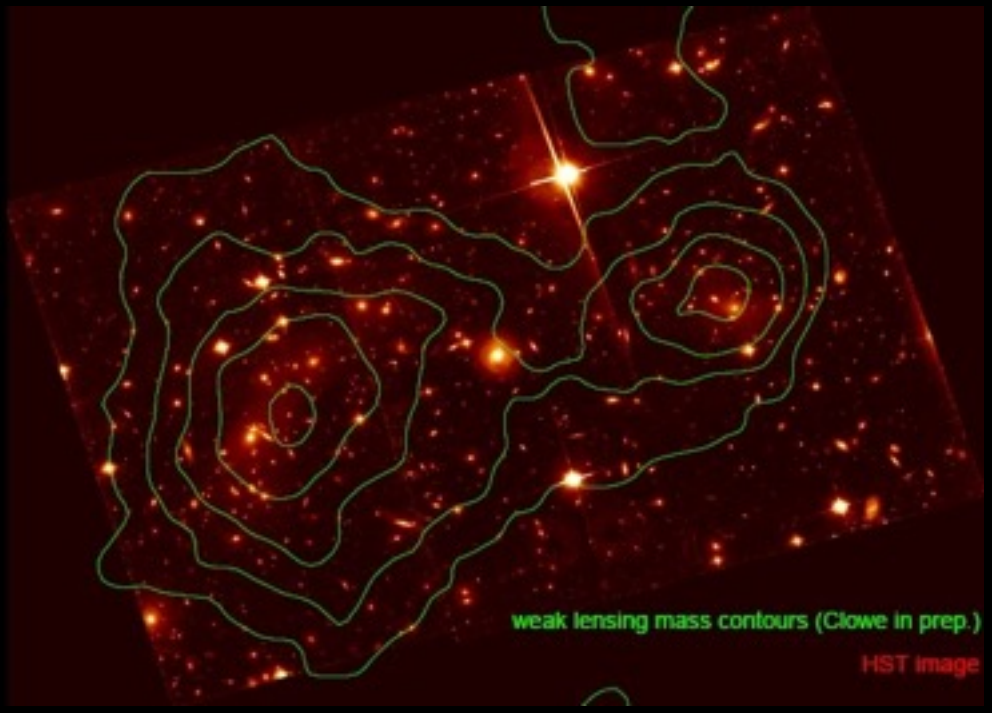
Amas Coma
Masse dynamique
= 400 fois la
masse lumineuse !

Smith (1936)

Amas Vierge
Même conclusion

Matière sombre : effet de Lentille gravitationelle

Effet très puissant pour détecter la matière sombre autour des amas, exemple de l'amas balle de fusil.

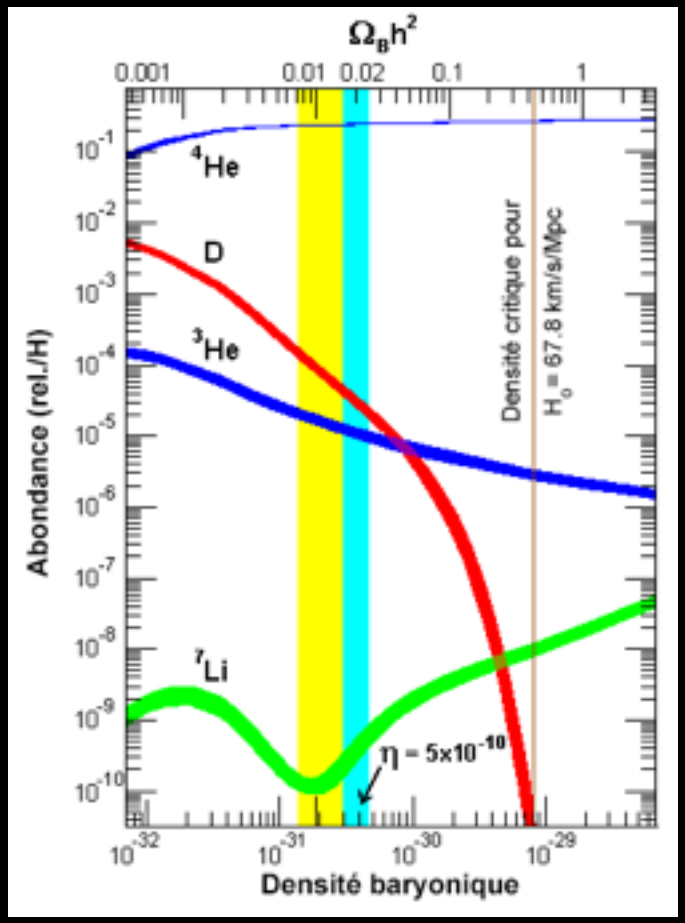


Matières sombres à diverses échelles

Type d'objet	Dimension	Rapport (M/L)	% de matière sombre
environnement solaire	100 pc	3-5	33%
spirales	30-50 kpc	10-20	70-90%
galaxies binaires	50-100 kpc	20-30	90%
Groupes	0.5-1.5 Mpc	50-150	95%
amas	1-5 Mpc	200-500	99%

Nature de la matière sombre ?

La matière sombre est étrange!



MATIERE BARYONIQUE

- S Burles, D Tytler (1998)
- D/H = 3,4± 0.3 x 10^{-5}
- Ω_B = 2% Ω_{total}

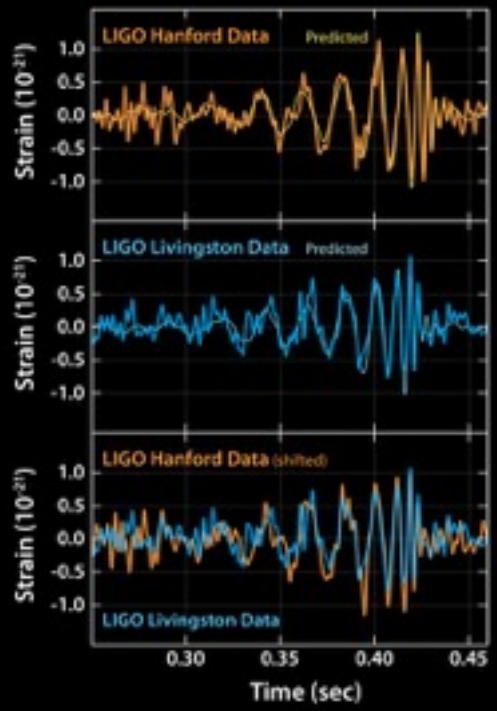
- Matière sombre ne peut pas être baryonique !

La matière sombre est étrange!

Pourquoi pas sous forme de trous noirs ?

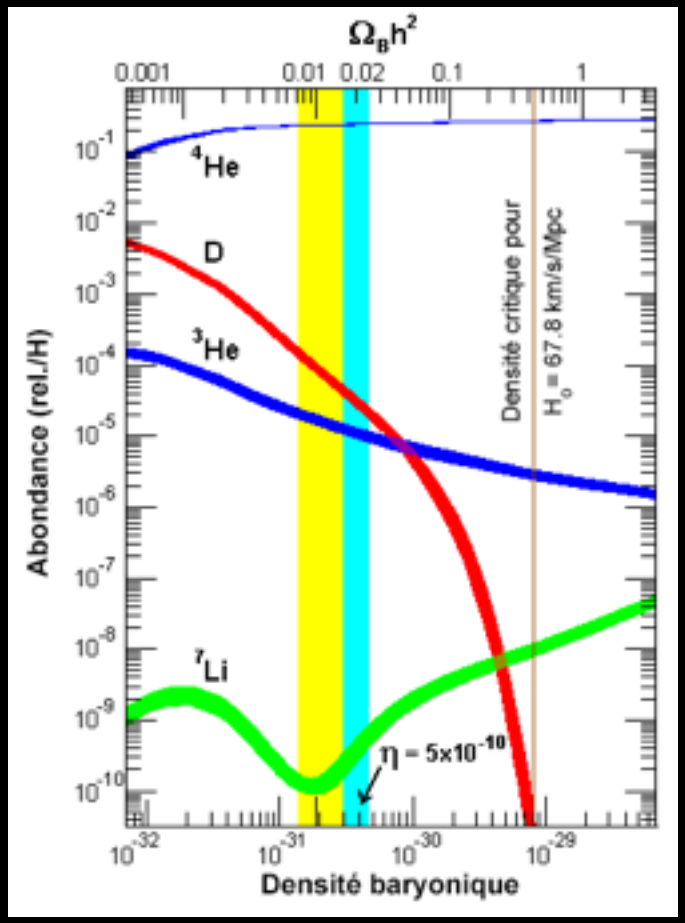
Découvertes des ondes gravitationnelles

- Fusion trous noirs de 29 et de 36 $M_\odot$



- (plus grand exploit technique et théorique de l'histoire de l'humanité !)
- La matière sombre est-elle faite de TN ? (2 fusions en 6mois d'opération c'est statistiquement improbable!)

La matière sombre est étrange!



MATIERE BARYONIQUE

- S Burles, D Tytler (1998)
- D/H = 3,4± 0.3 x 10^{-5}
- Ω_B = 2% Ω_{total}

- Matière sombre ne peut pas être baryonique !

Matière sombre: conclusion

La théorie physique actuelle ne permet pas de reproduire l'univers sans modification.

1- On peut inventer une composante: la matière sombre

2- On peut également modifier les lois de la physique...

L'histoire de la physique montre que les deux voies sont fertiles et ont permis des avancées (échec éther, réussite positrons).

Energie sombre ?

L'histoire de l'énergie sombre est liée au développement théorique de la Relativité Générale d'Einstein, mais la gravitation Newtonienne la prédit également.

Avant 1929 (Hubble), l'univers était supposé statique !

Energie sombre ?

Or les équations de la gravitation impose un univers en mouvement (expansion ou contraction). Einstein suppose donc qu'il existe un paramètre opposé au champs de gravitation qui empêche l'Univers de s'effondrer.

La constante cosmologique est née.

Energie sombre ?

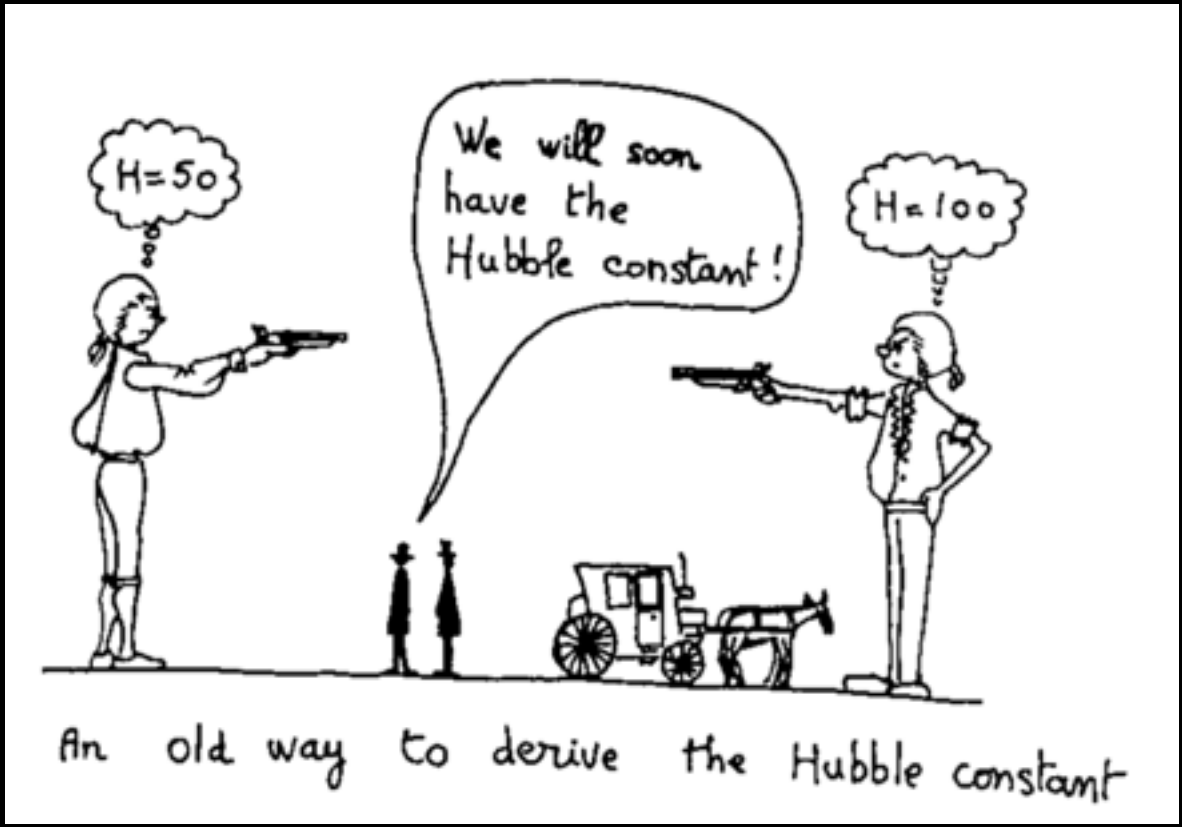
Pendant le XXe siècle, les cosmologistes ont passé toute leur énergie à mesurer trois nombres:

La densité de l'univers, La vitesse d'expansion de l'univers, La courbure géométrique de l'univers

La vitesse d'expansion de l'univers, H_0 en particulier a fait l'objet d'un vif débat, et beaucoup de techniques ont été développées pour établir l'échelle cosmologique.

Energie sombre ?

La vitesse d'expansion de l'univers, Ho en particulier a fait l'objet d'un vif débat, et beaucoup de techniques ont été développées pour établir l'échelle cosmologique.



Energie sombre ?

Ces techniques suivent la même démarche:

- mesurer la vitesse de récession (décalage spectral) des objets

- mesurer leur distance

→ H_0 = vitesse de récession [km/s] / distance [Mpc]

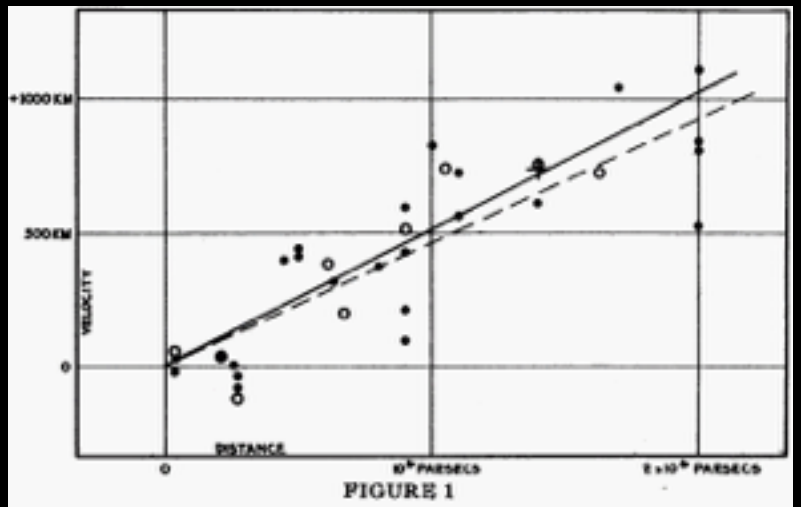


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Energie sombre ?

Mesurer la distance des objets n'est pas simple !

- Quand les objets sont proches, effet géométrique (parallaxe: HIPARCOS, GAIA, ...).

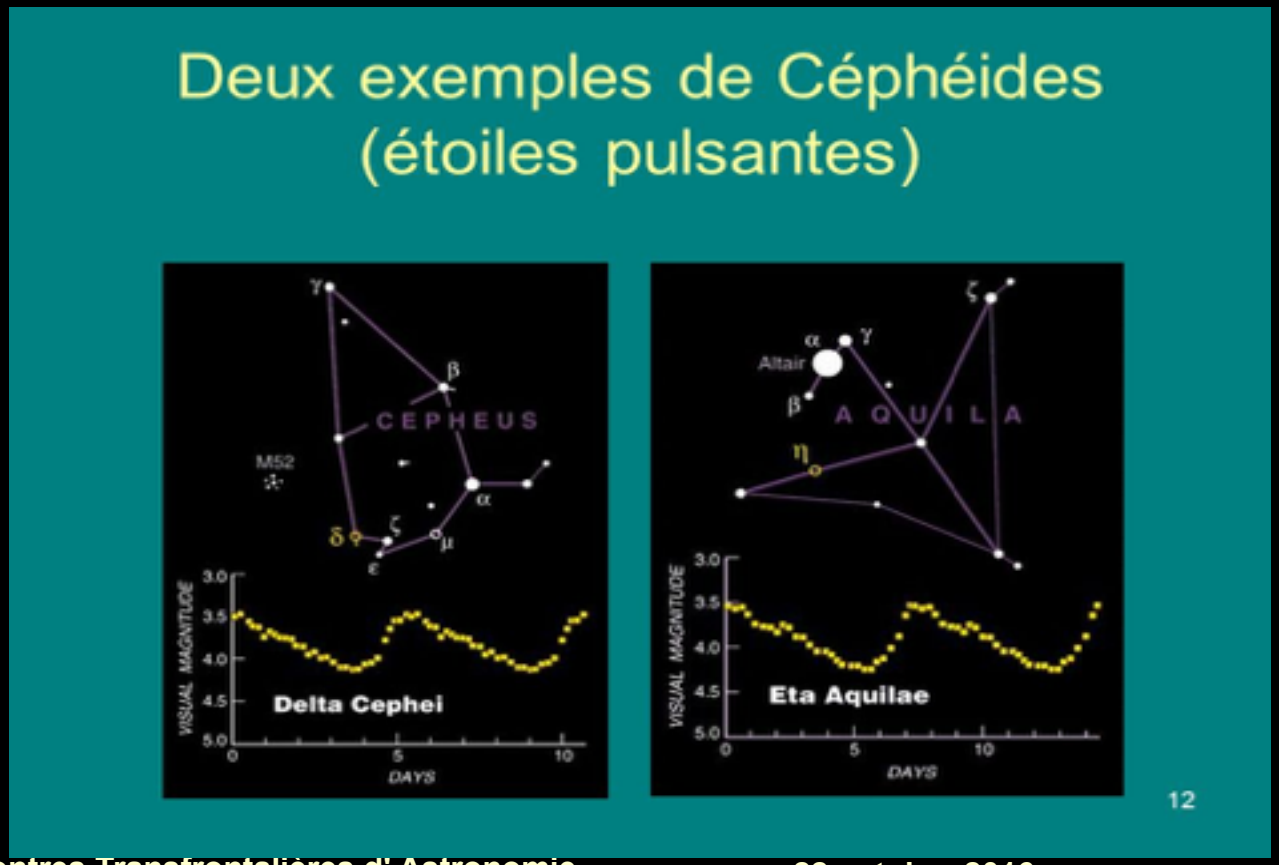
J. Bradley tente une première mesure, mais découvre l'aberration astronomique et en déduit que la vitesse de la lumière est 10000 x la vitesse de révolution de la Terre autour du Soleil.

- Quand les objets sont lointains: bougie-étalon

Energie sombre ?

Bougie-étalon: Objet dont on connait la brillance absolue

Etoiles pulsantes (RR Lyrae, Céphéïdes).

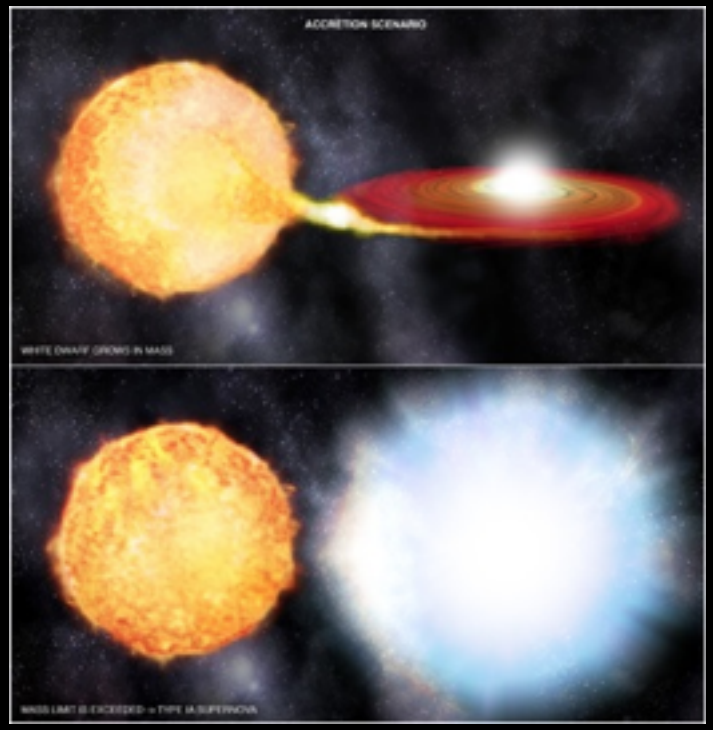


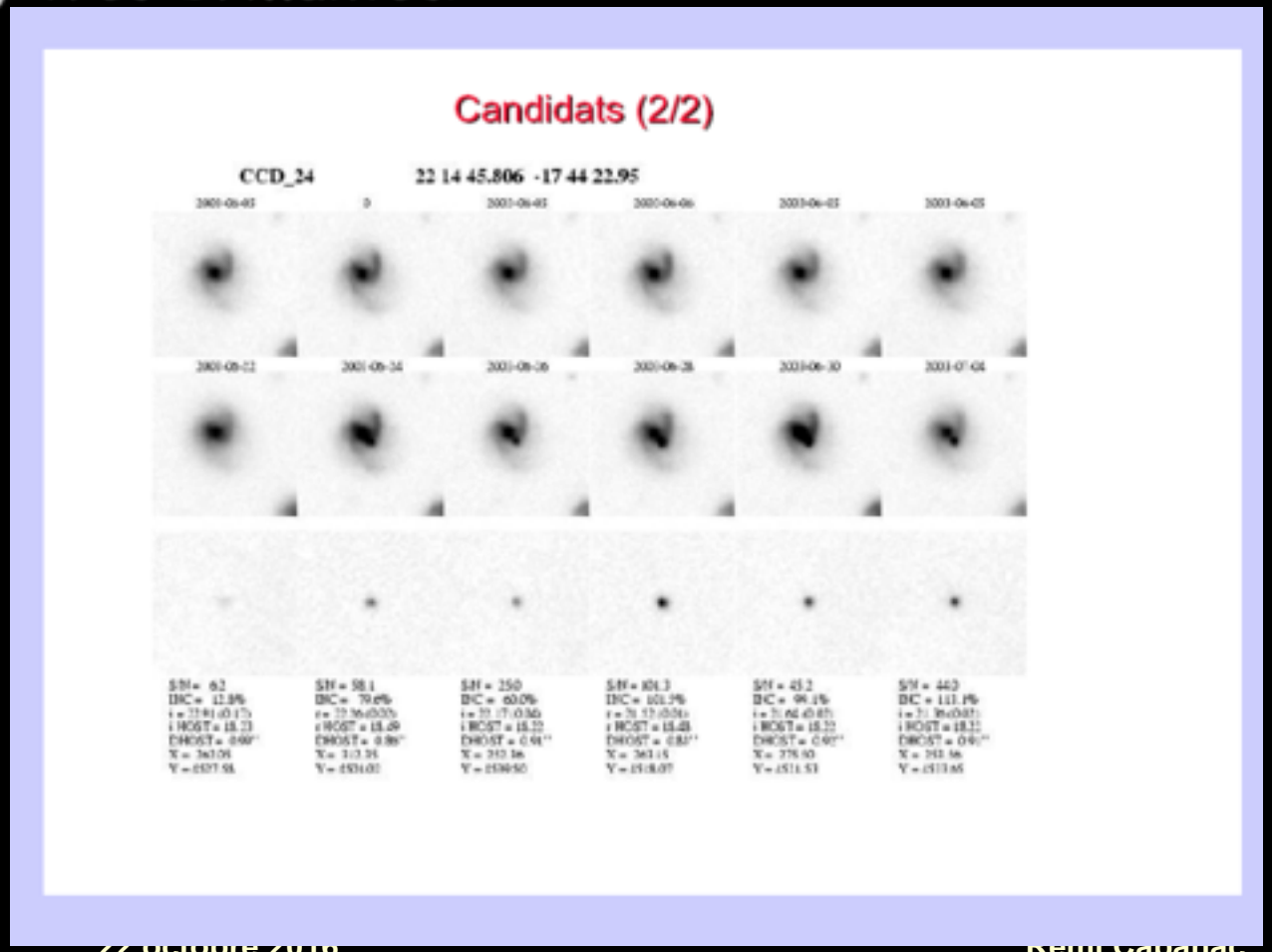
Pas très brillantes

Visibles dans les galaxies proches

Energie sombre ?

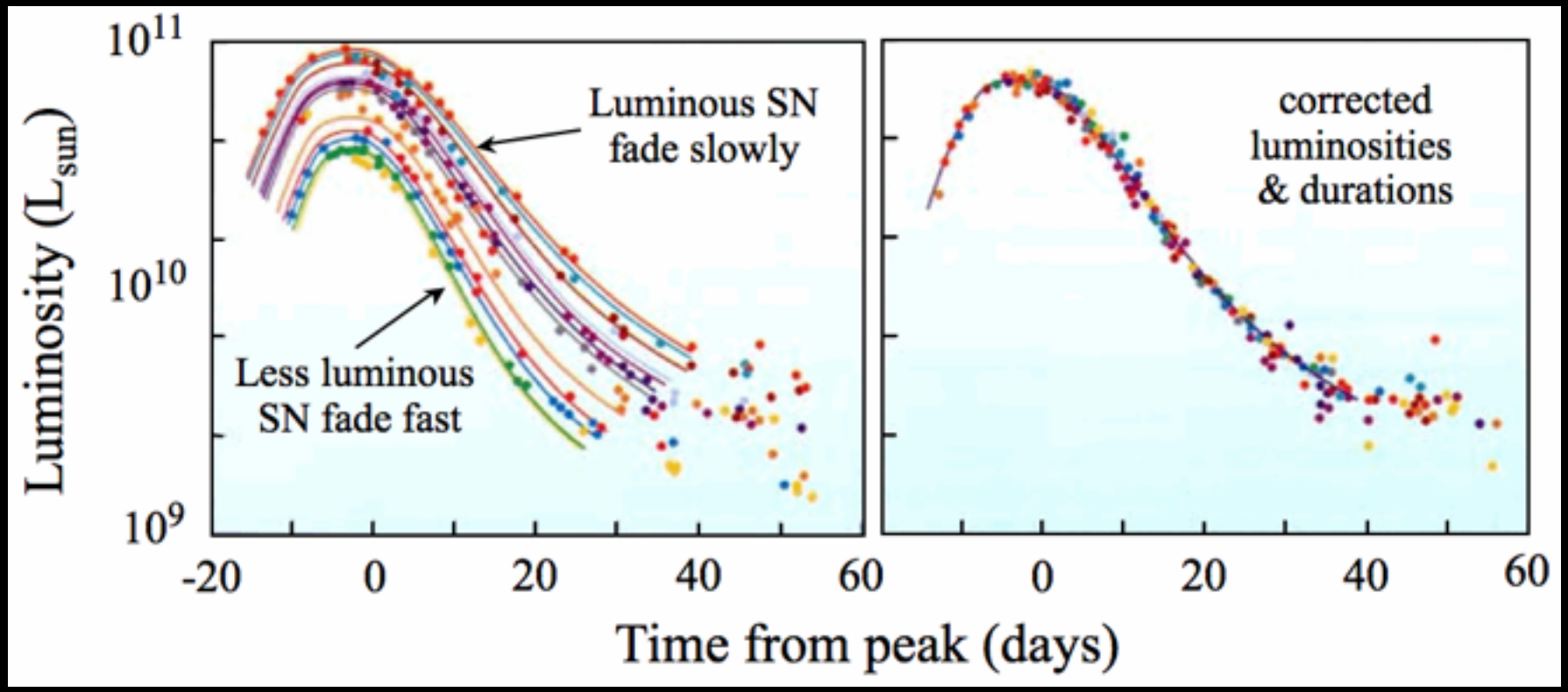
Bougie-étalon: Supernova Ia (Zwicky 1961, Kowal 1968, Hamuy et al. 1998...) très brillantes.





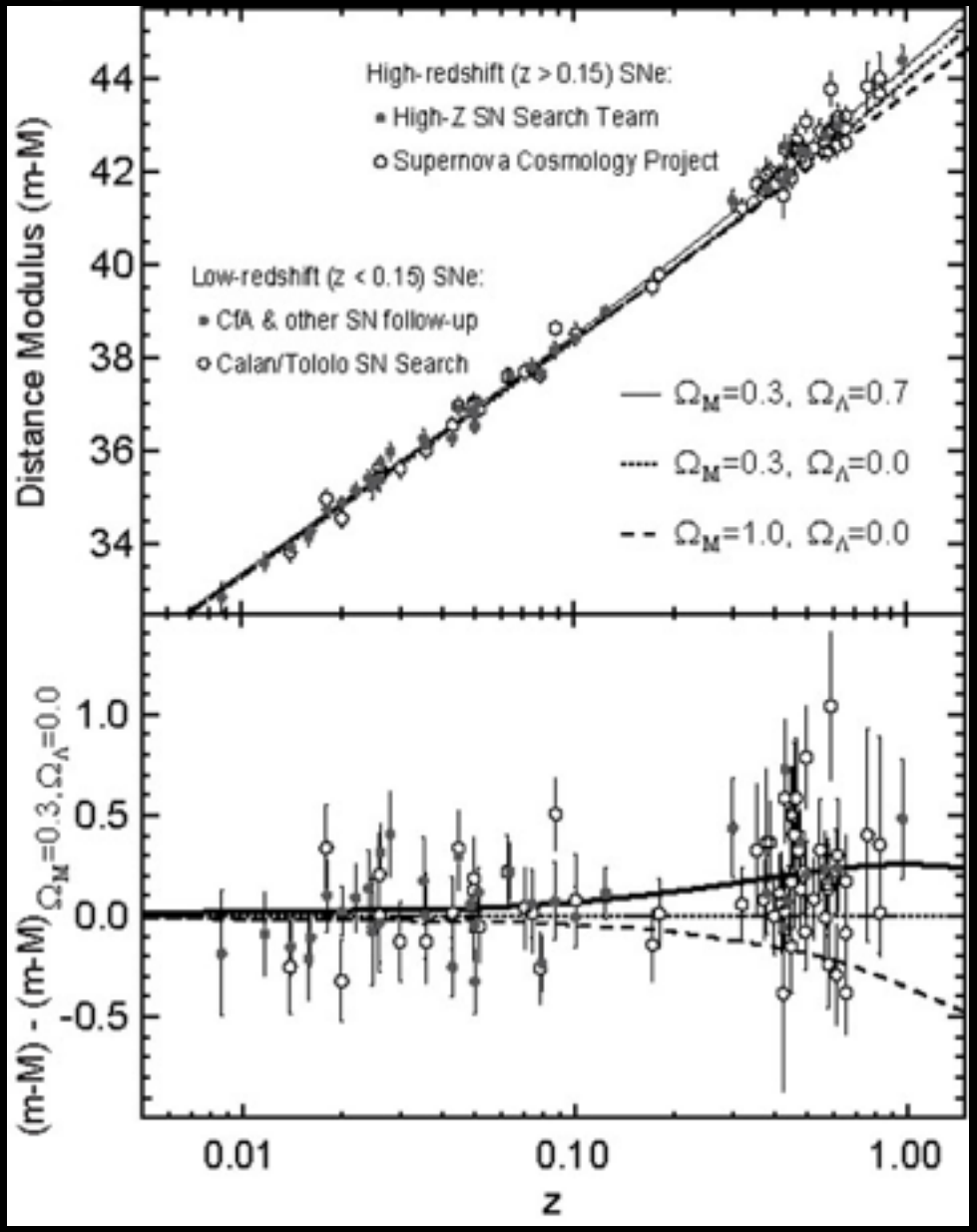
Energie sombre ?

Bougie-étalon: Supernova Ia (Zwicky 1961, Kowal 1968, Hamuy 1998)

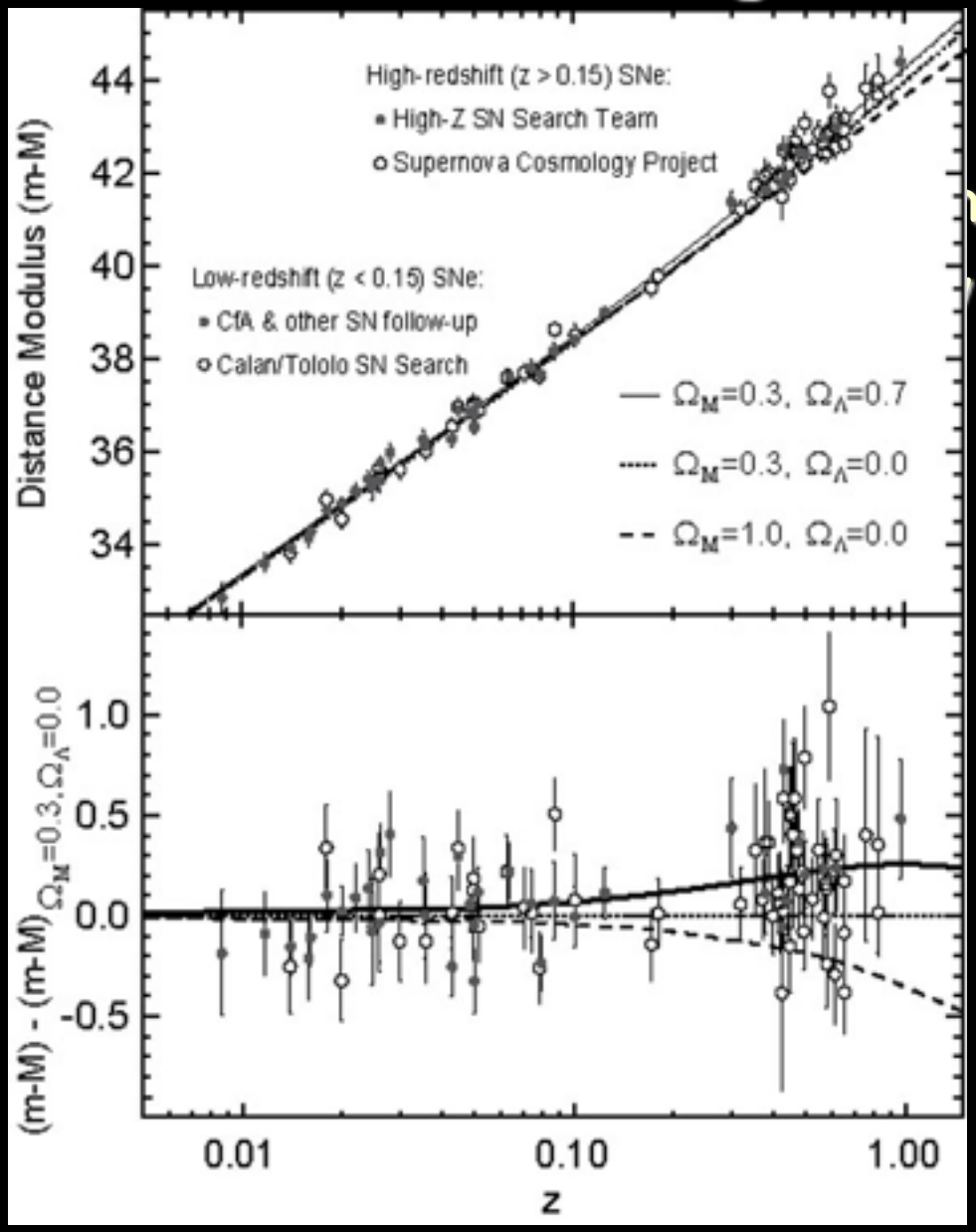


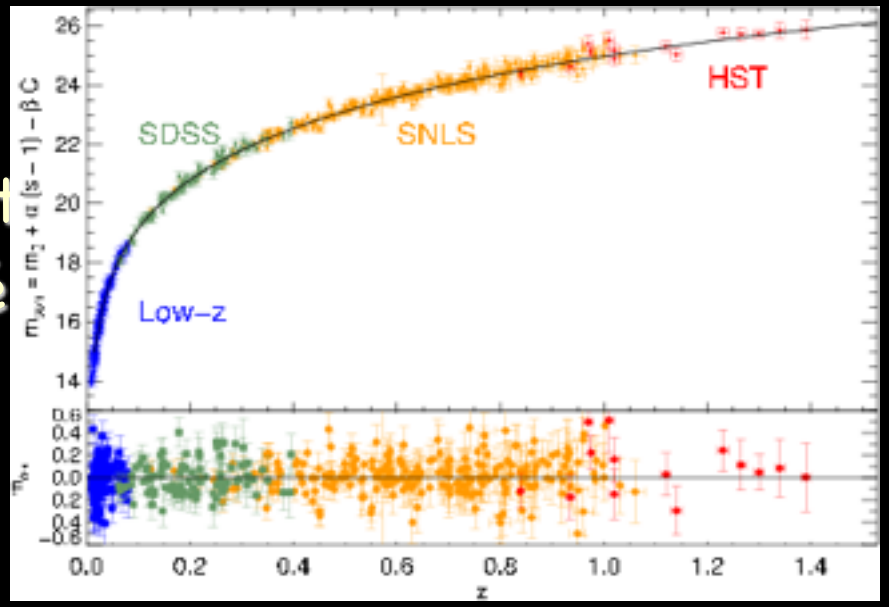
Energie sombre ?

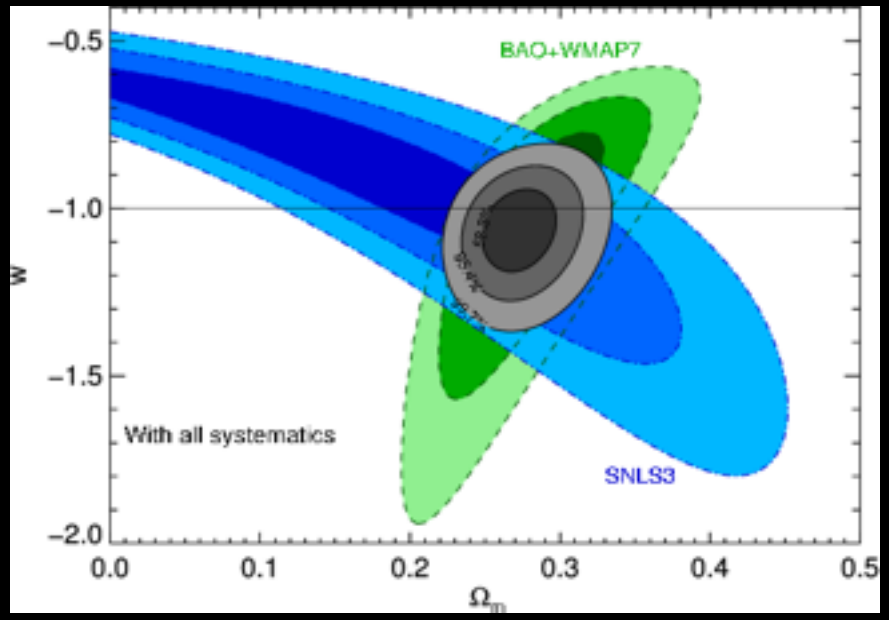
1998: Grosse surprise, Riess, Smith, Perlmutter annonce que le diagramme de Hubble dérivé des SN Ia montre une accélération de l'expansion.



Energie sombre ?







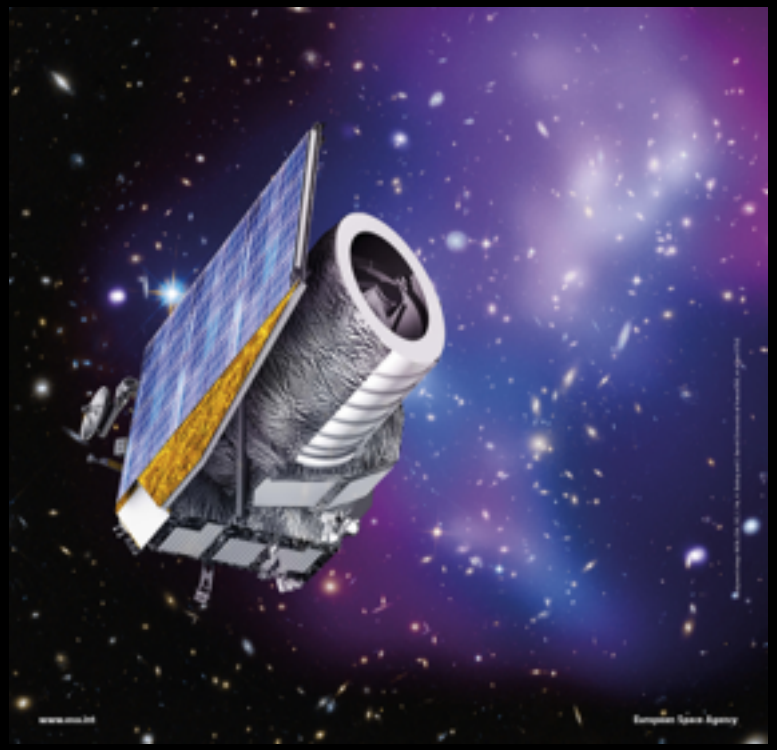
En 2016 et +

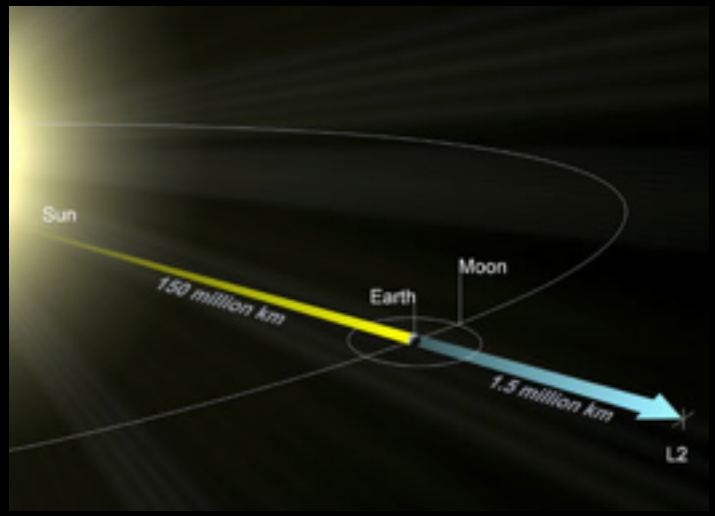
On observe les effets indirects de la matière sombre avec les lentilles gravitationnelles (ou la modification des lois de la physique!)

Les cosmologistes du monde entier préparent une mission spatiale ESA (EUCLID, 2020-2025) pour étudier les composantes sombres de l'univers.

En 2016 et +

EUCLID: www.euclid-ec.org





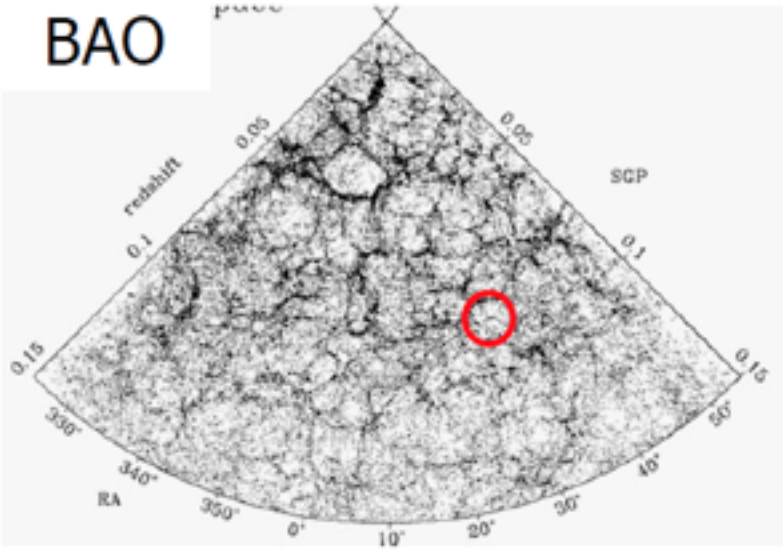
L'énergie sombre est-elle une constante cosmologique (hypothèse d'Einstein) ou
Est-elle un nouveau type de champs d'énergie, évoluant dynamiquement avec l'expansion de l'univers ?
Sinon, l'énergie sombre montre-t-elle la limite de la Relativité Générale et une déviation de la loi de gravitation ?
Quelle est la nature et les propriétés de la matière sombre ?
Quelles sont les conditions initiales gouvernant la formation des structures cosmiques ?
Quel sera le futur de l'univers dans les prochaines 1à milliard d'années ?

BAO, RSD and WL over 15,000 deg^2

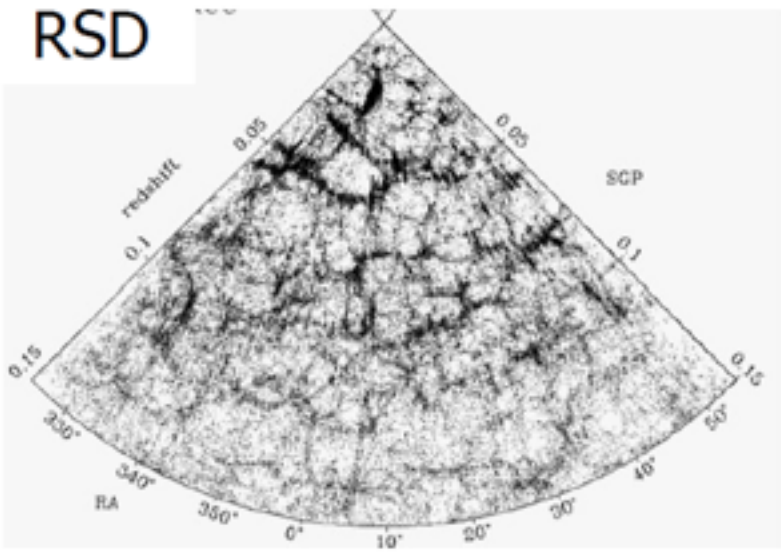
50 million galaxies with redshifts

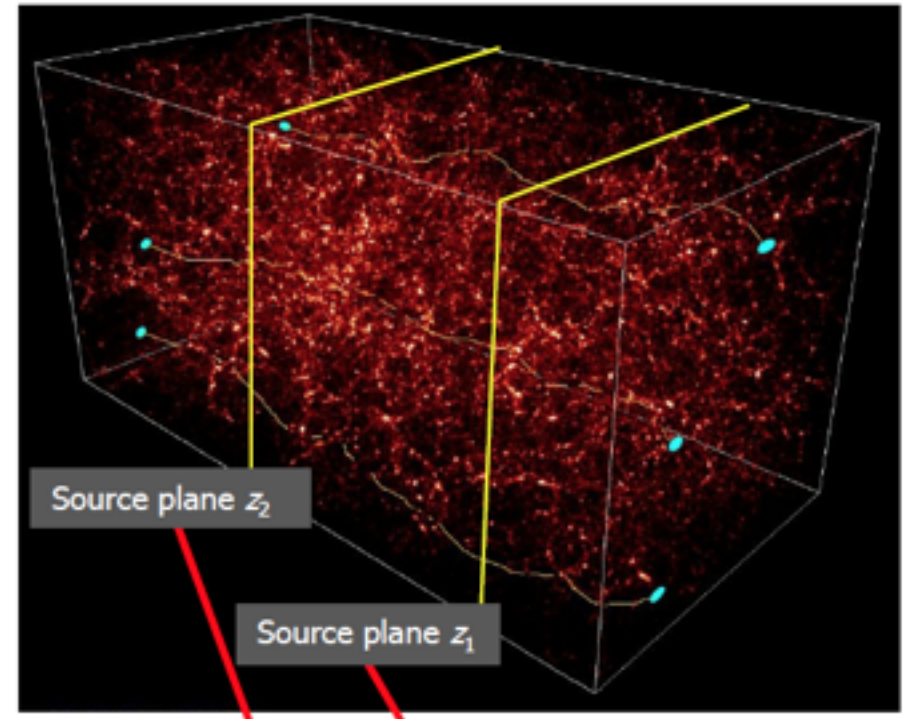
1.5 billion sources with shapes, 10 slices

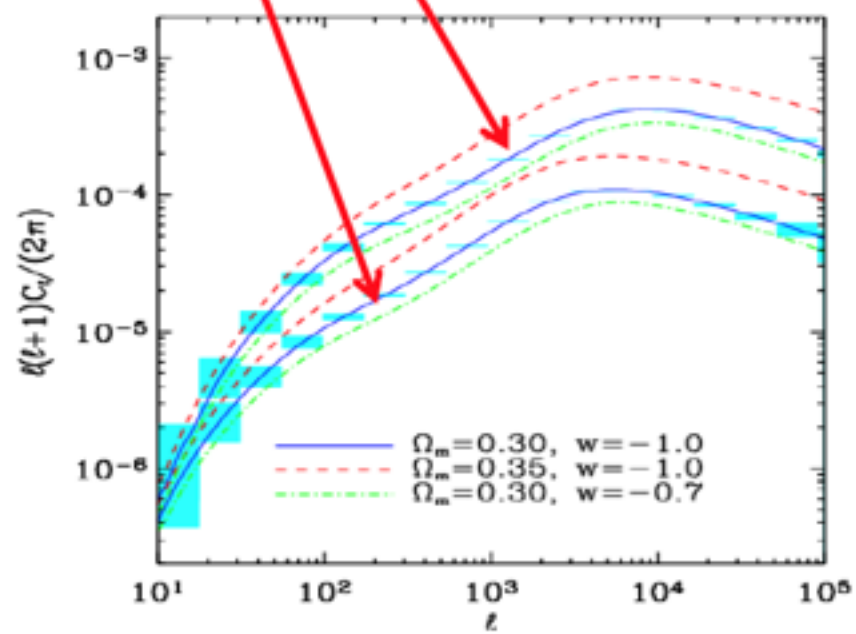
BAO



RSD

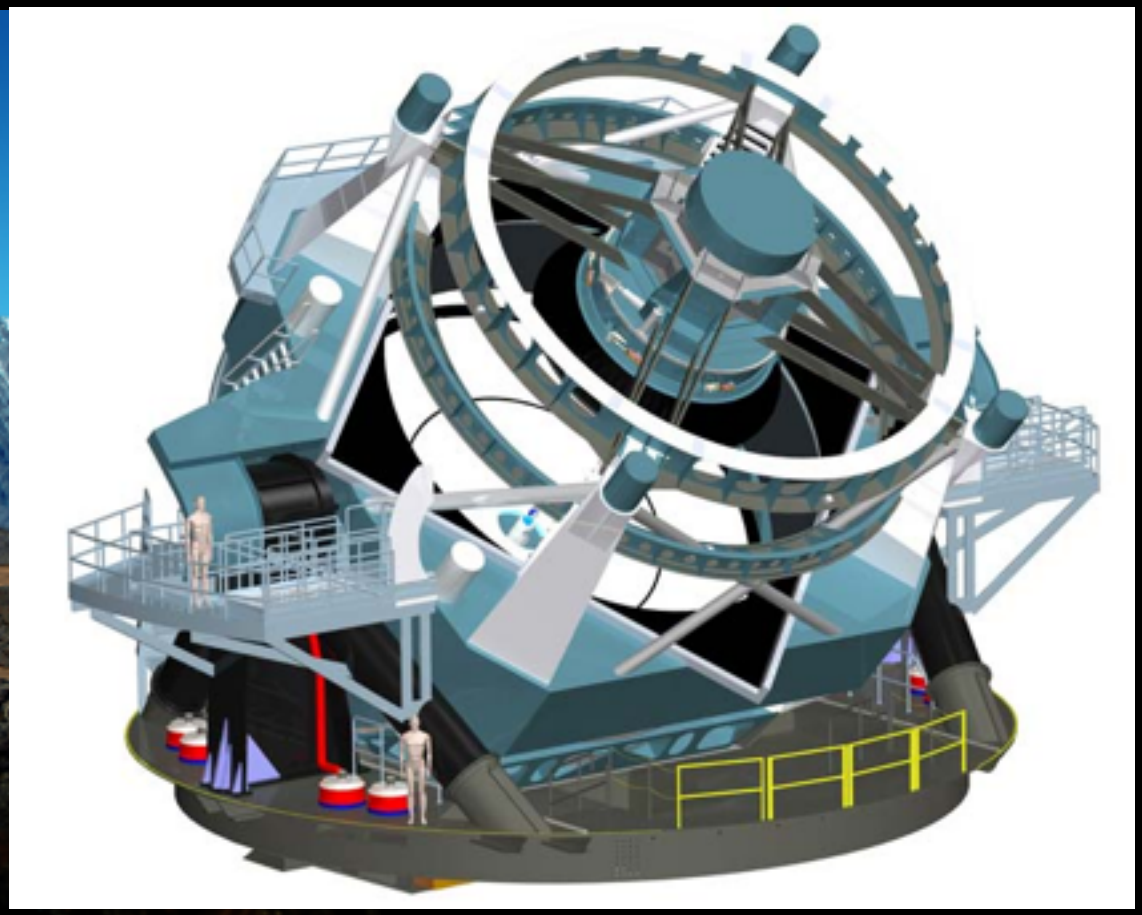






En 2016 et +

Au sol: Large Synoptic Survey Telescope 2020…



En 2016 et +

Au sol: Large Synoptic Survey Telescope 2020...

Le LSST en chiffres:

- miroir primaire de 8.4-m
- caméra CCD 3,2 Gigapix
- Taille d'image = 40 pleines lunes.
- Sondages du ciel pendant 10 ans
- 10 million d'alertes, 1000 paires d'images,

  15 Teraoctets de données ... chaque nuit !

construction de la structure à grande échelle de l'Univers

Merci de votre attention !