

Cosmologie Moderne

Cours 13-14



J.-Ch. Hamilton, APC
hamilton@apc.univ-paris7.fr



Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ La matière noire
 - ★ Energie sombre: Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?



Matière noire

- Pourquoi ?

- ★ Dynamique des amas
- ★ Courbes de rotation des galaxies
- ★ Formation des structures et fond diffus

- Quels candidats ?

- ★ Objets compacts
- ★ Particules «exotiques»
- ★ Modification de la gravité



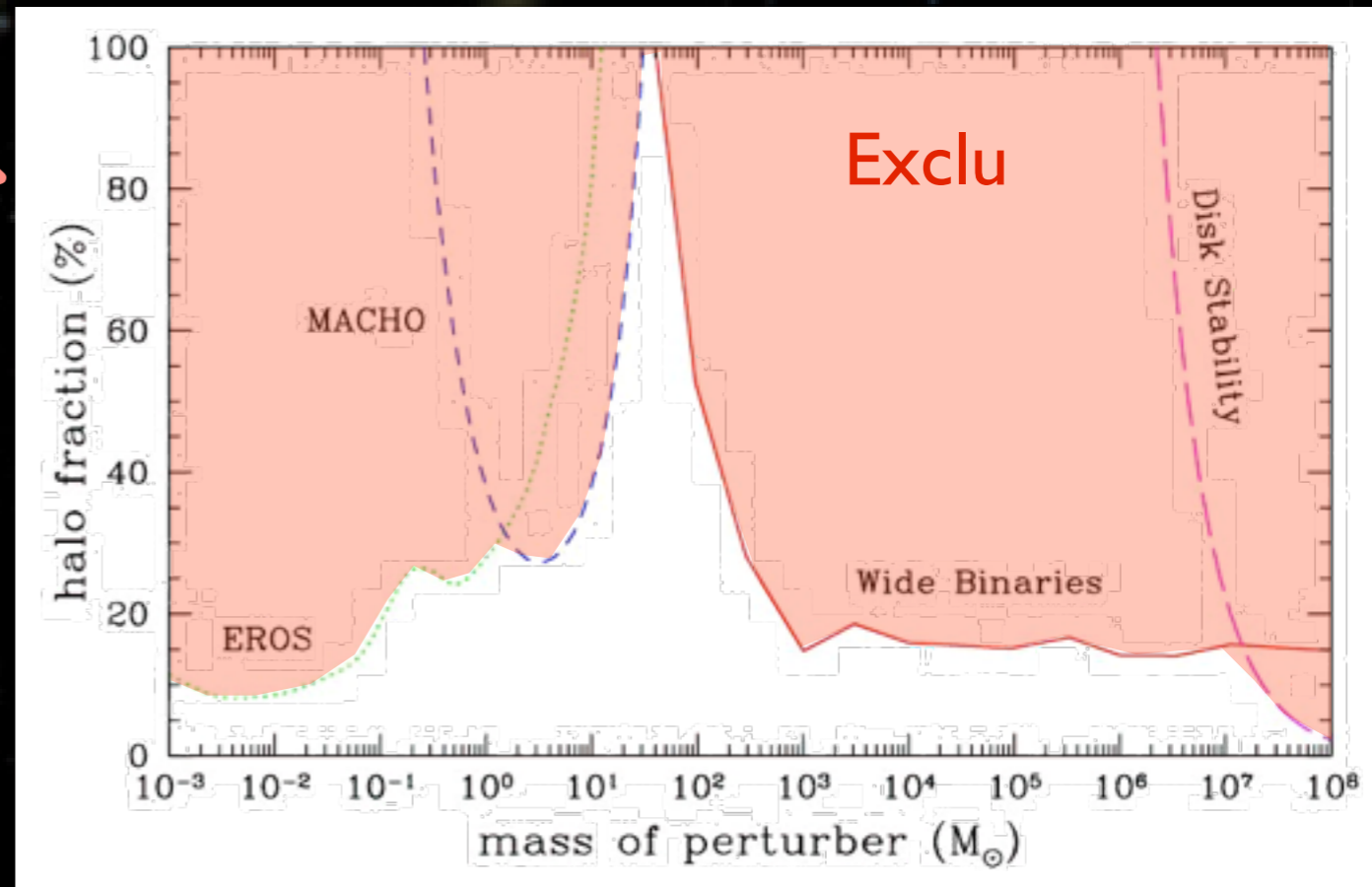
Le Bullet Cluster



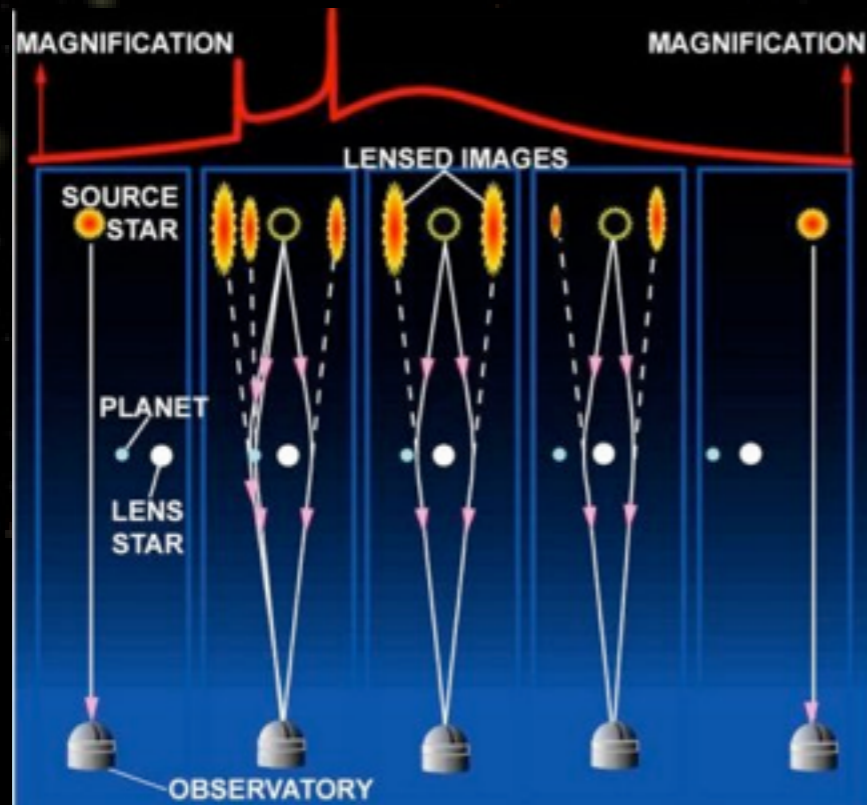
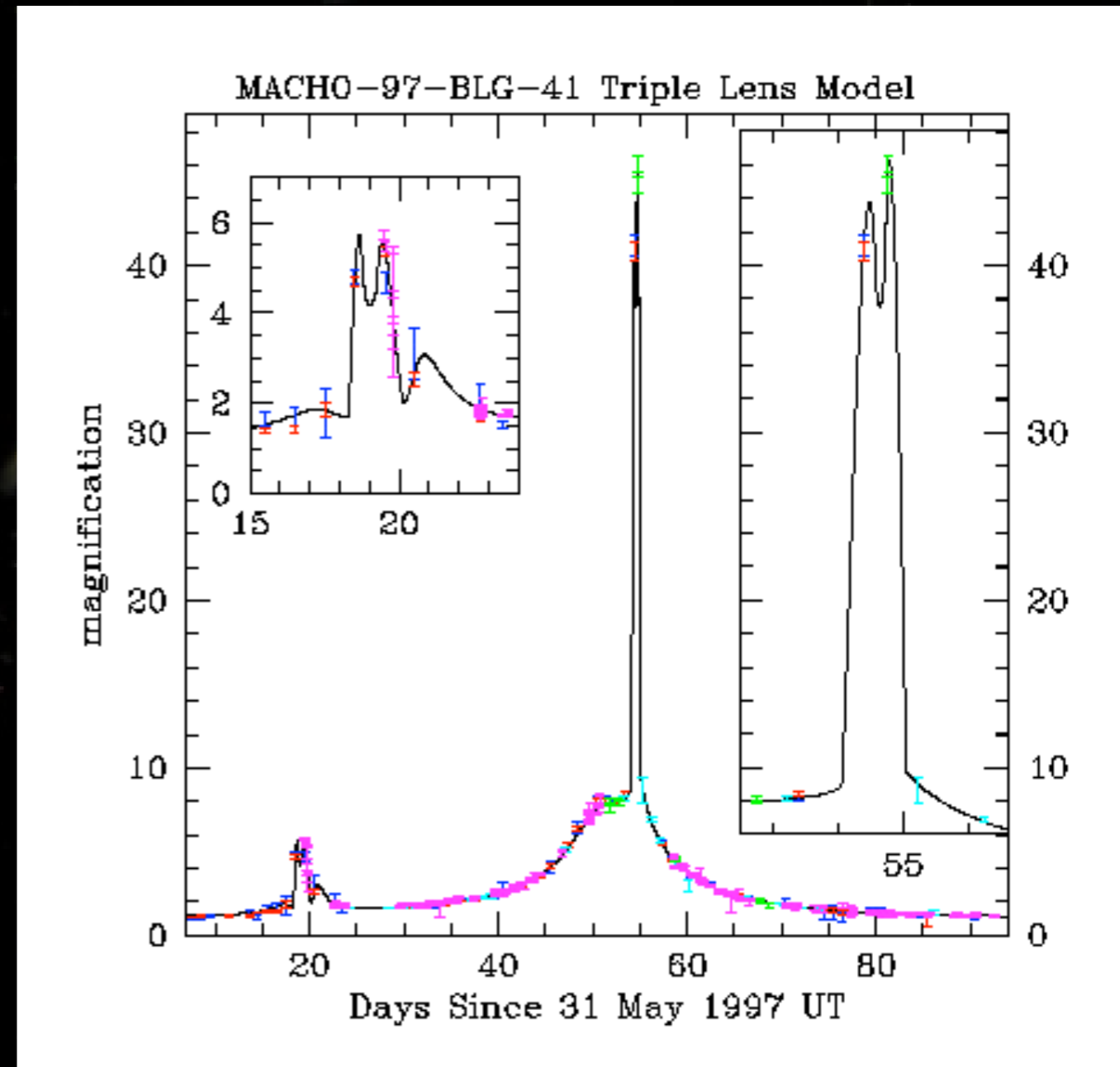
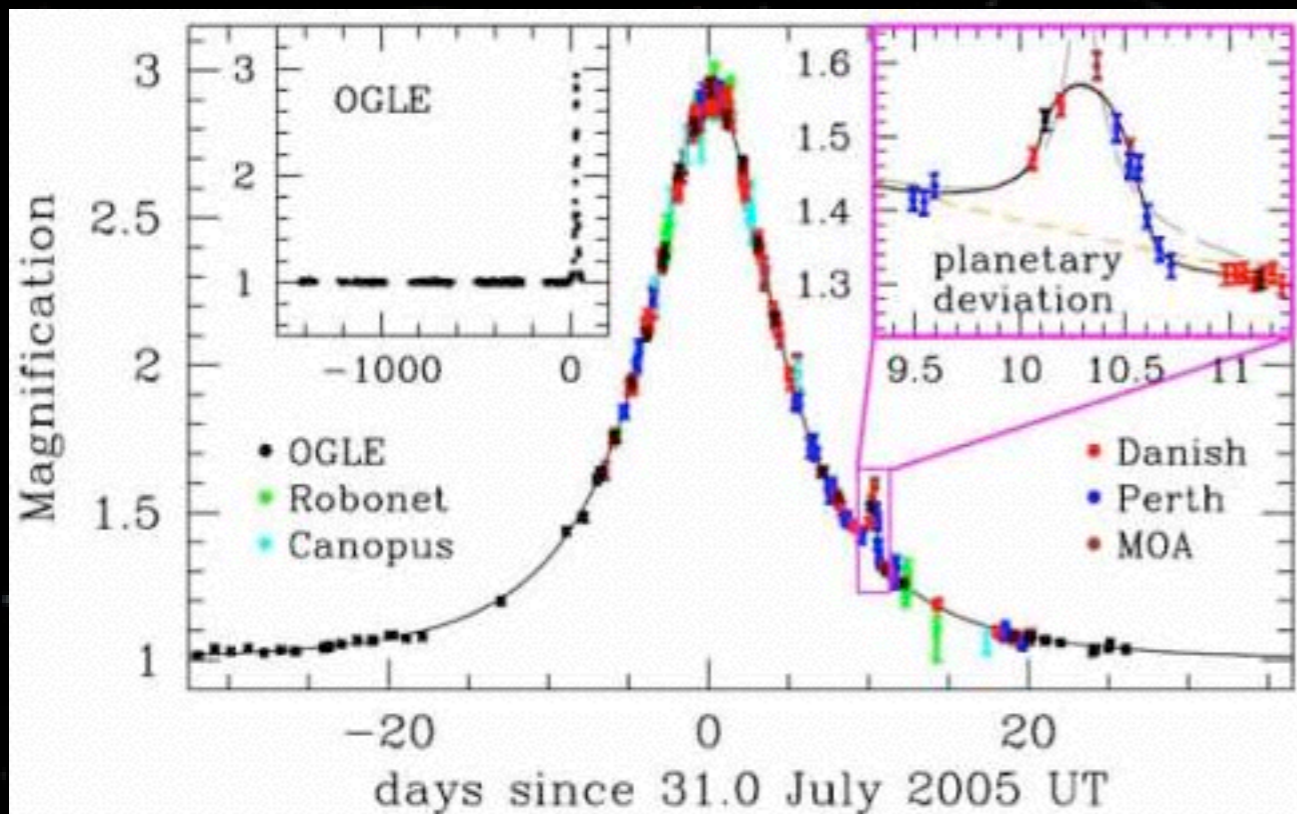
Candidats pour la matière noire

- Objets compacts

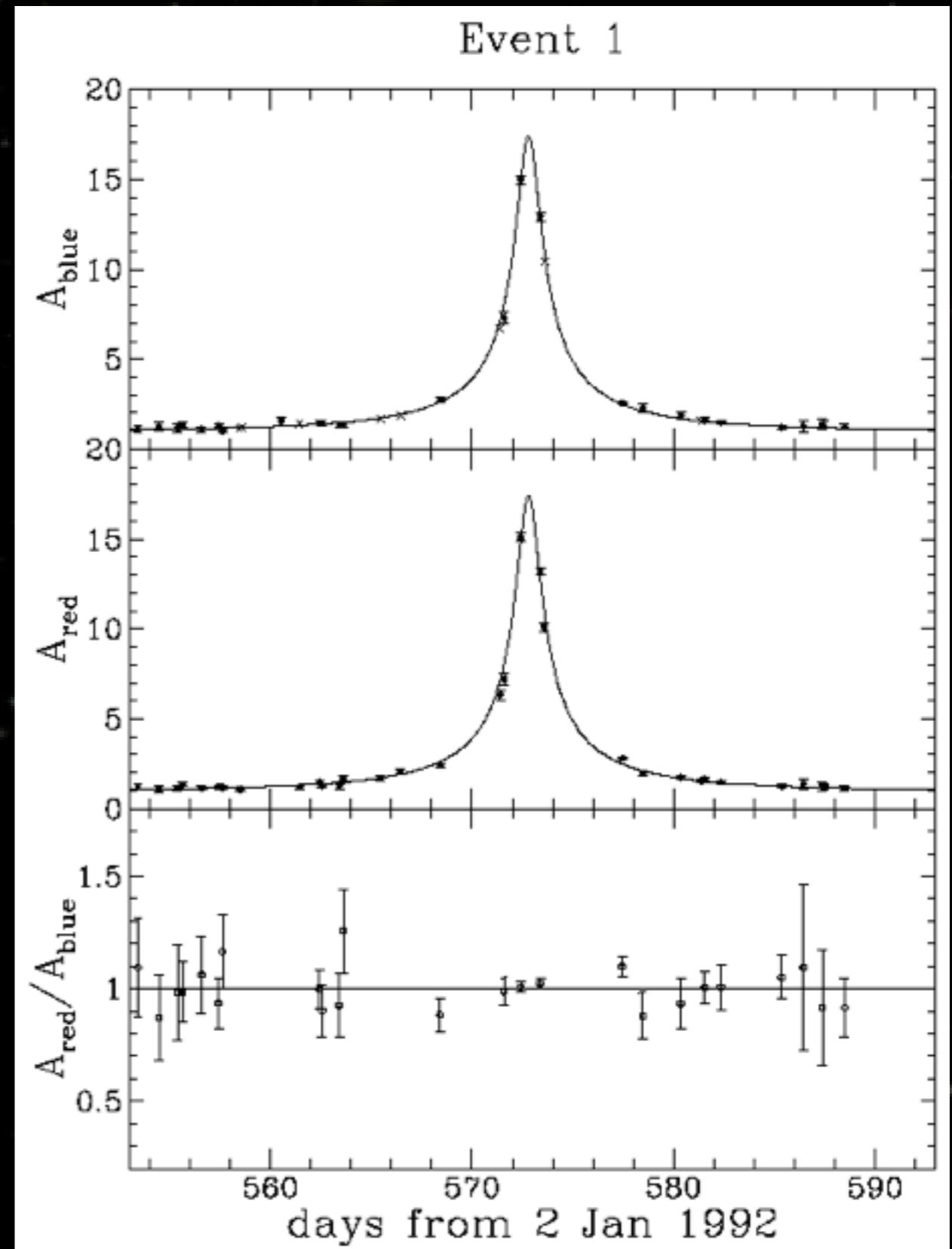
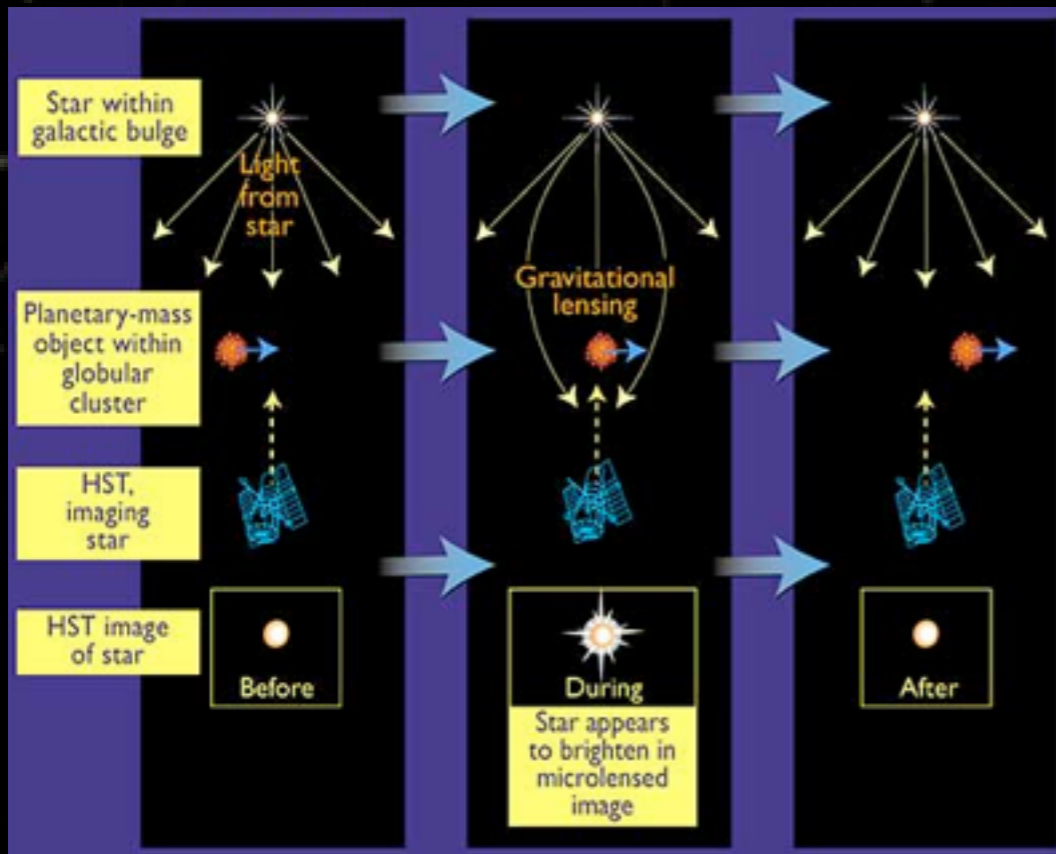
- Trous noirs, naines brunes
- Essentiellement exclus vers la fin des 90'



Microlensing

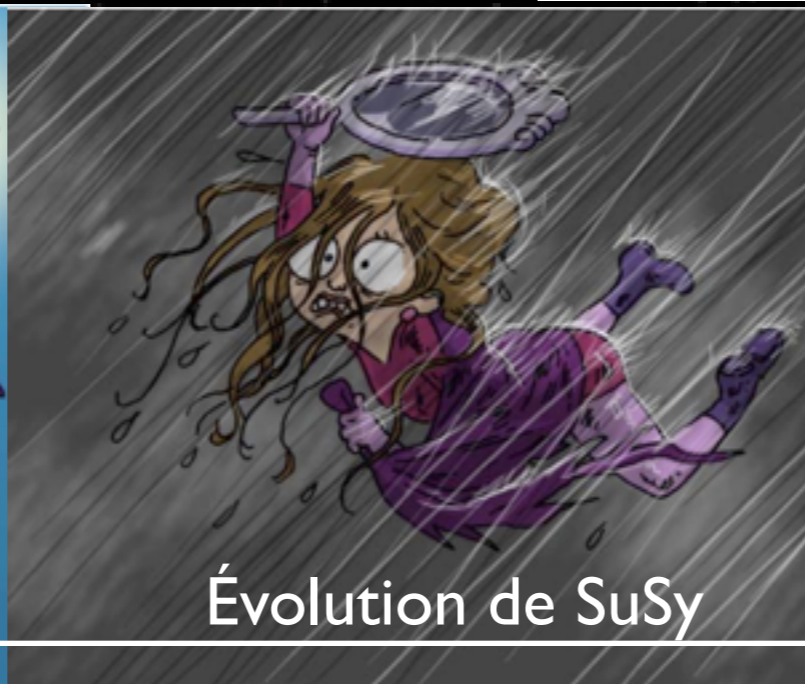
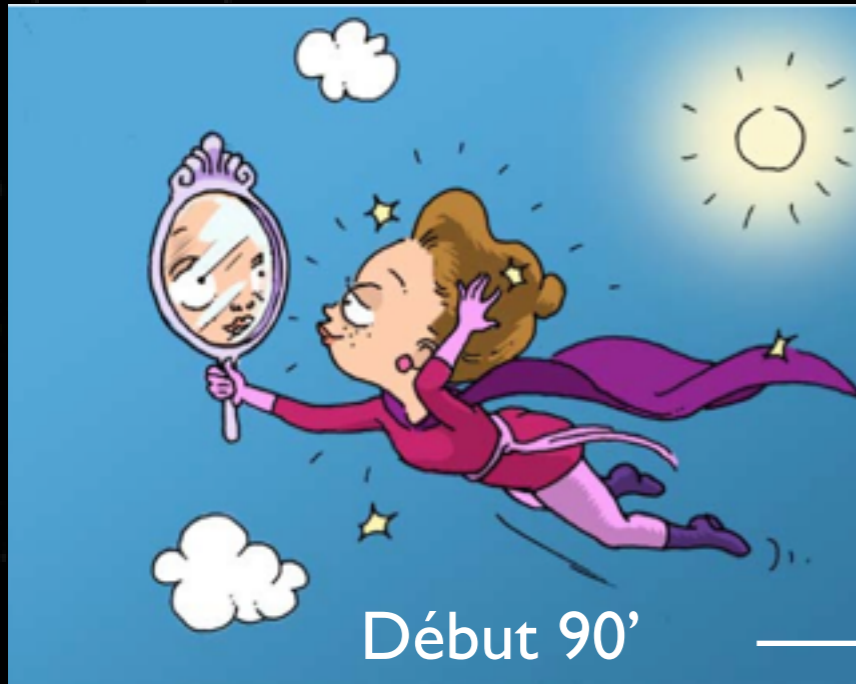
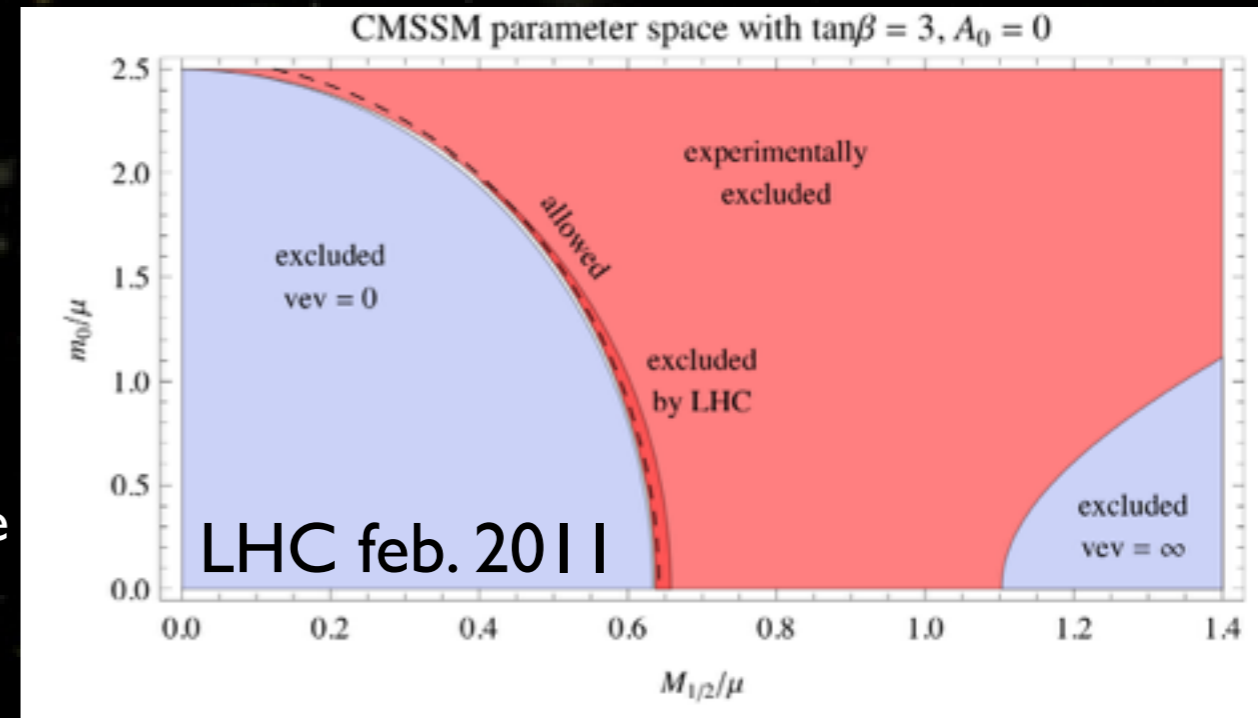


Microlensing



Candidats pour la matière noire

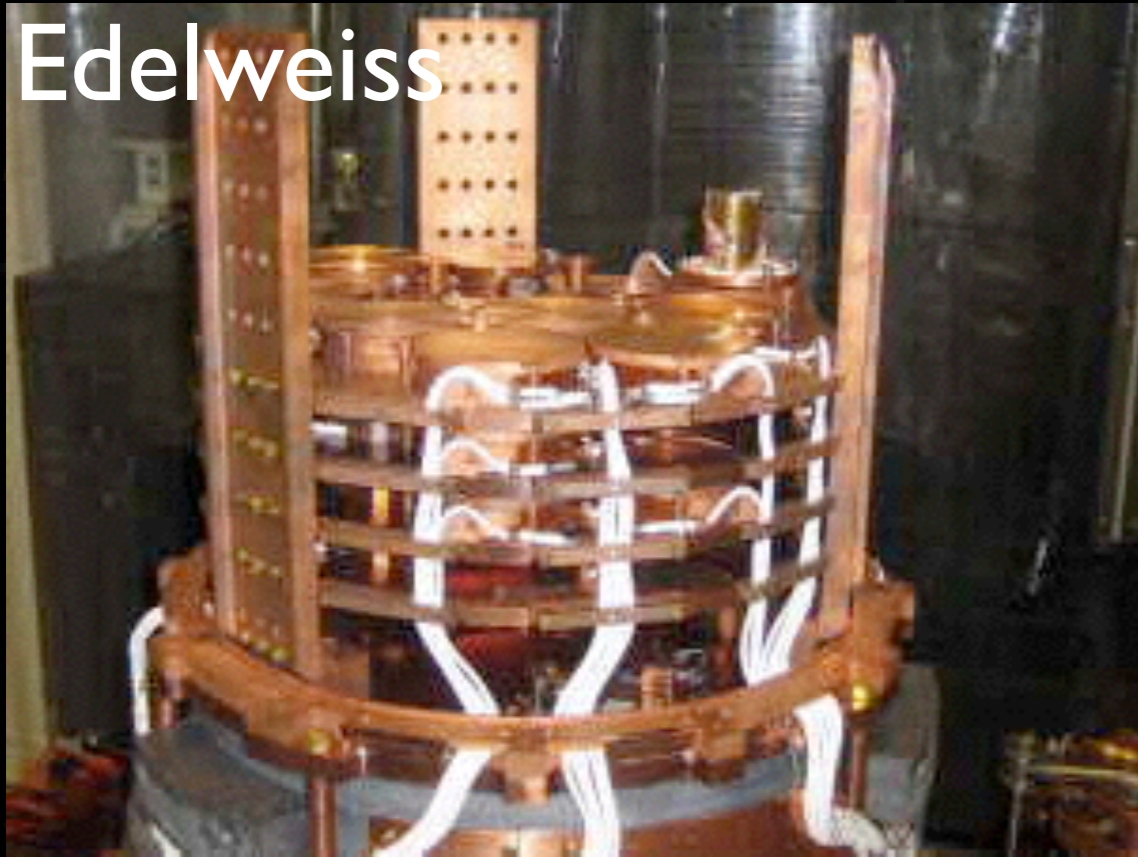
- Objets compacts
 - Trous noirs, naines brunes
 - Essentiellement exclus vers la fin des 90'
- Physique des particules
 - ★ Supersymetrie
 - modèles minimaux défavorisés par le LHC
 - détection directe (Edelweiss, CDMS, Xenon) ?
 - DAMA, COGENT, CRESST on annoncé une détection
 - ★ Dimensions supplémentaires, Axions



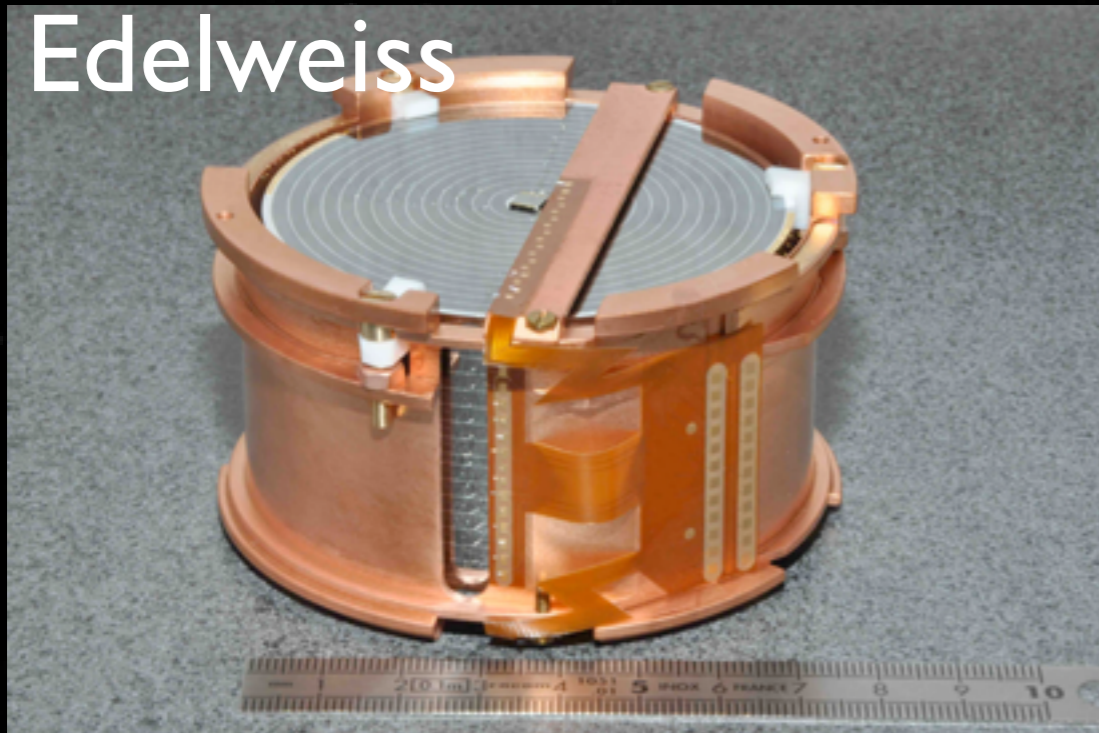
Recherche directe de matière noire

- Détection simultanée de la charge et de la chaleur

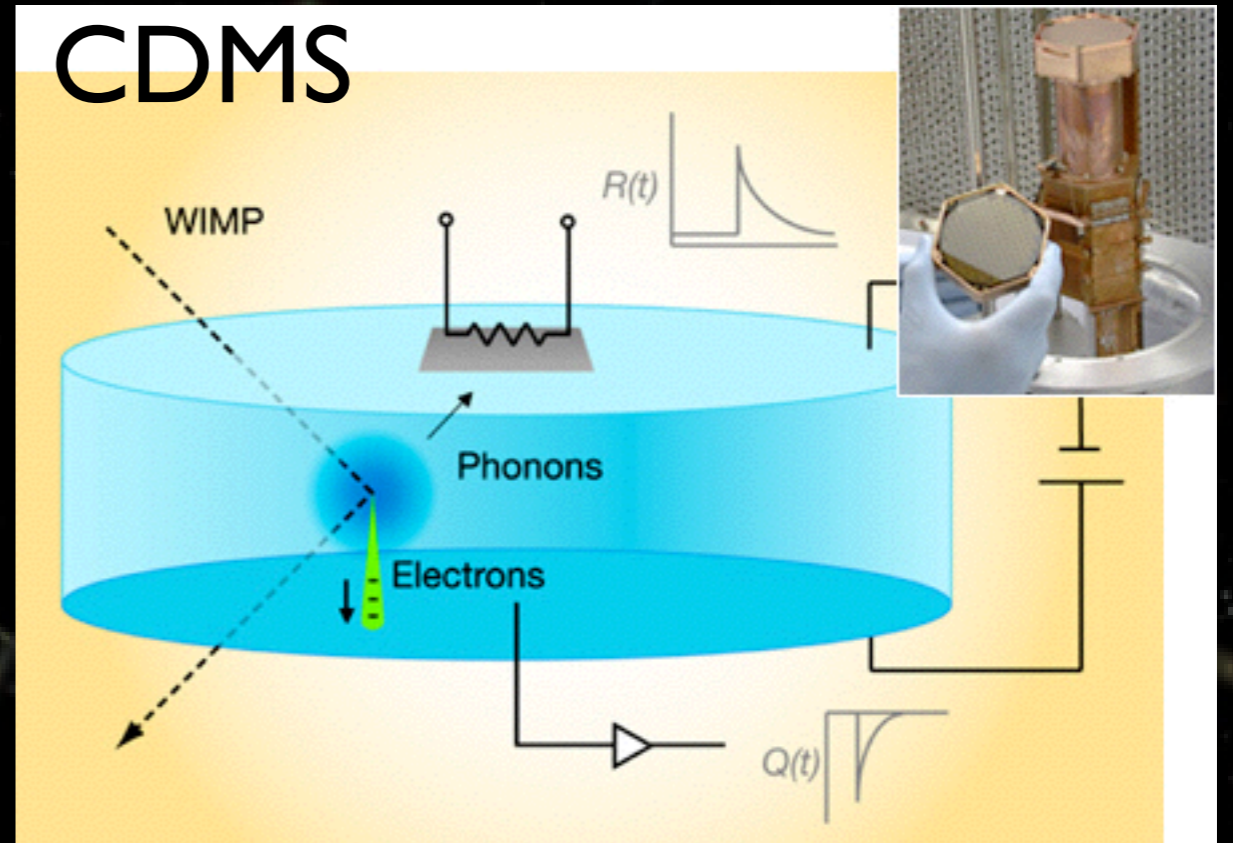
Edelweiss



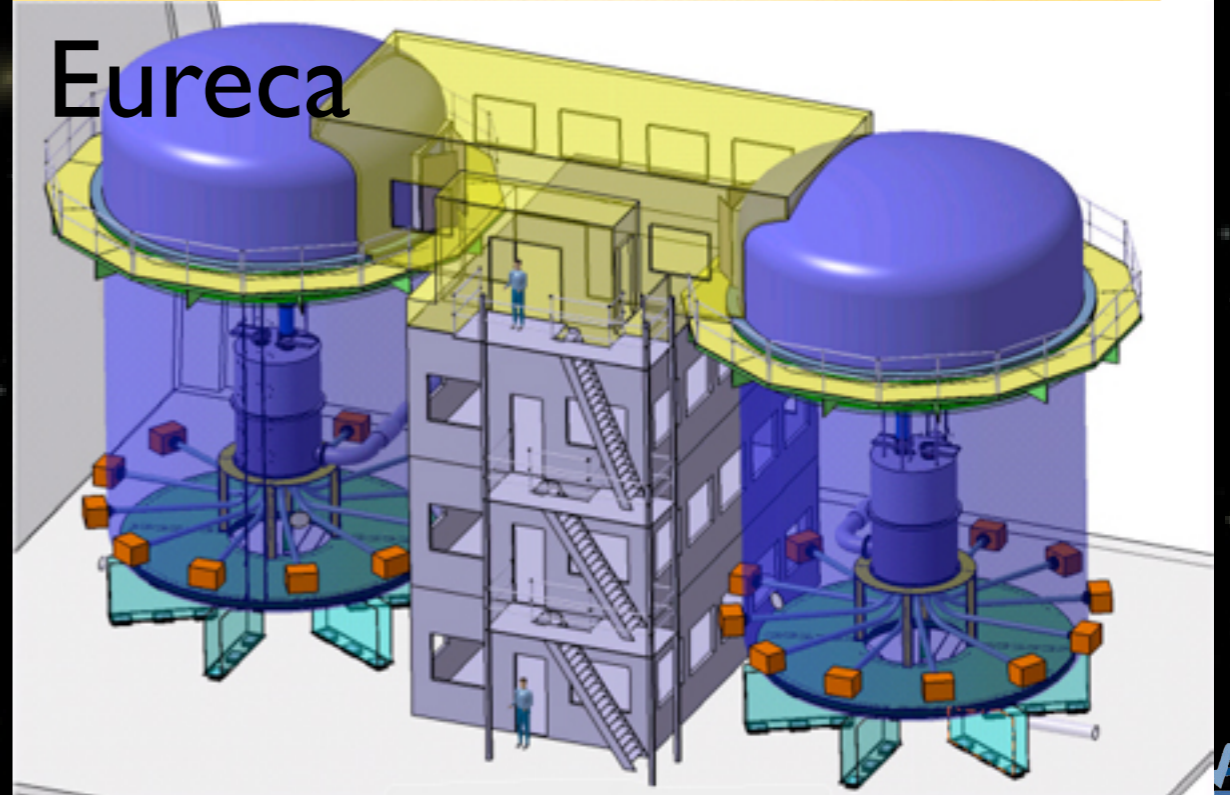
Edelweiss



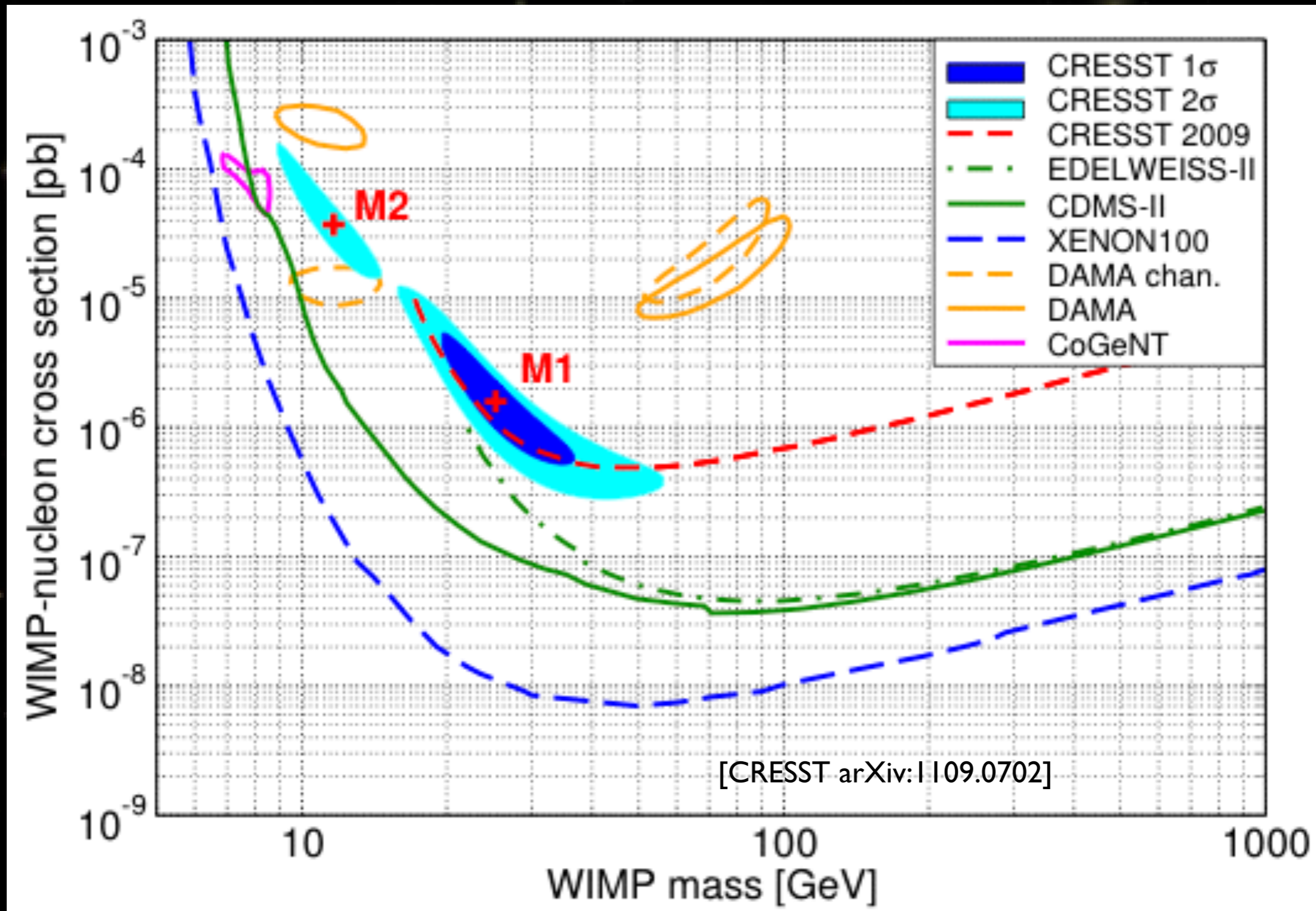
CDMS



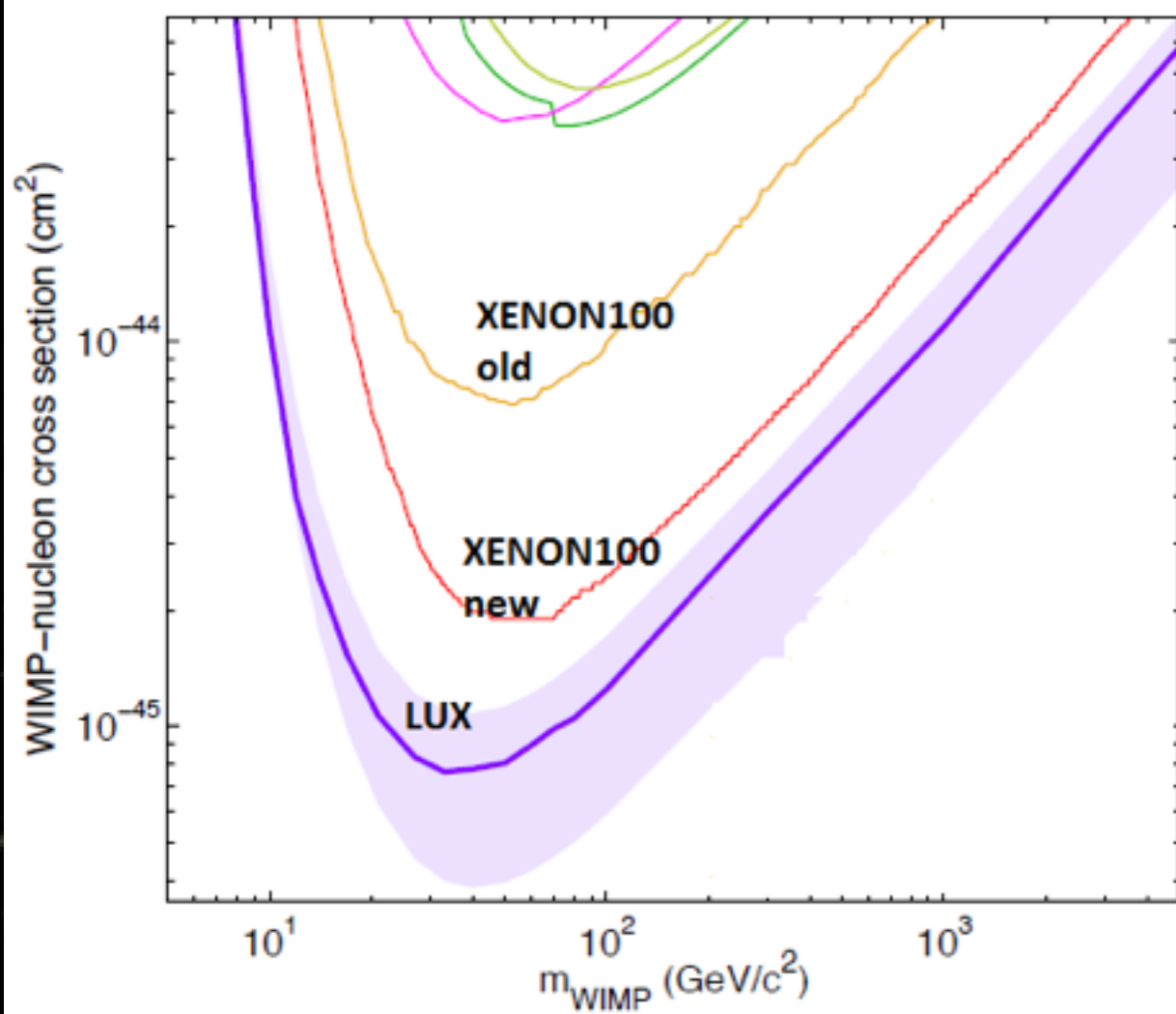
Eureca



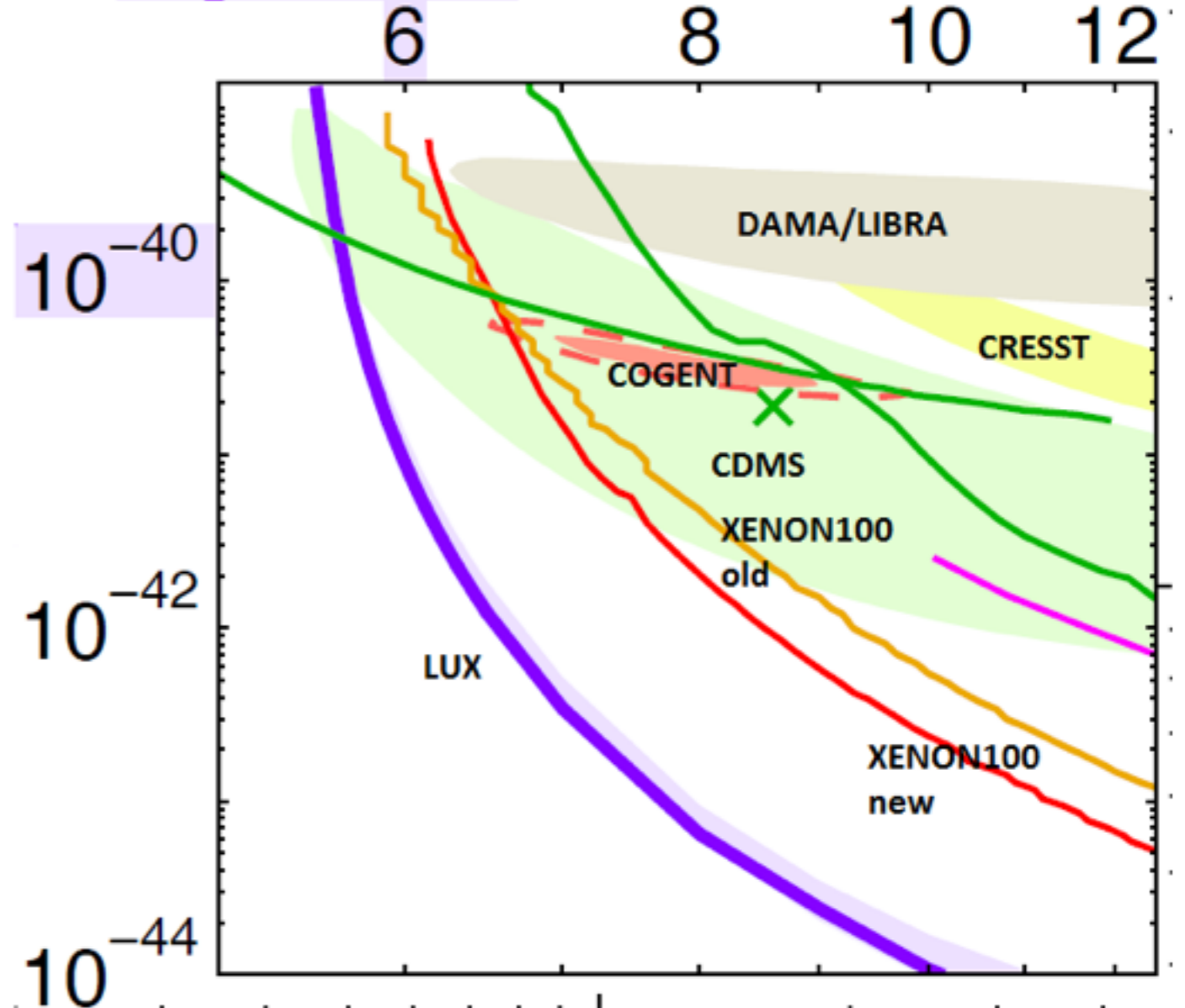
Recherche directe de matière noire



Recherche directe de matière noire

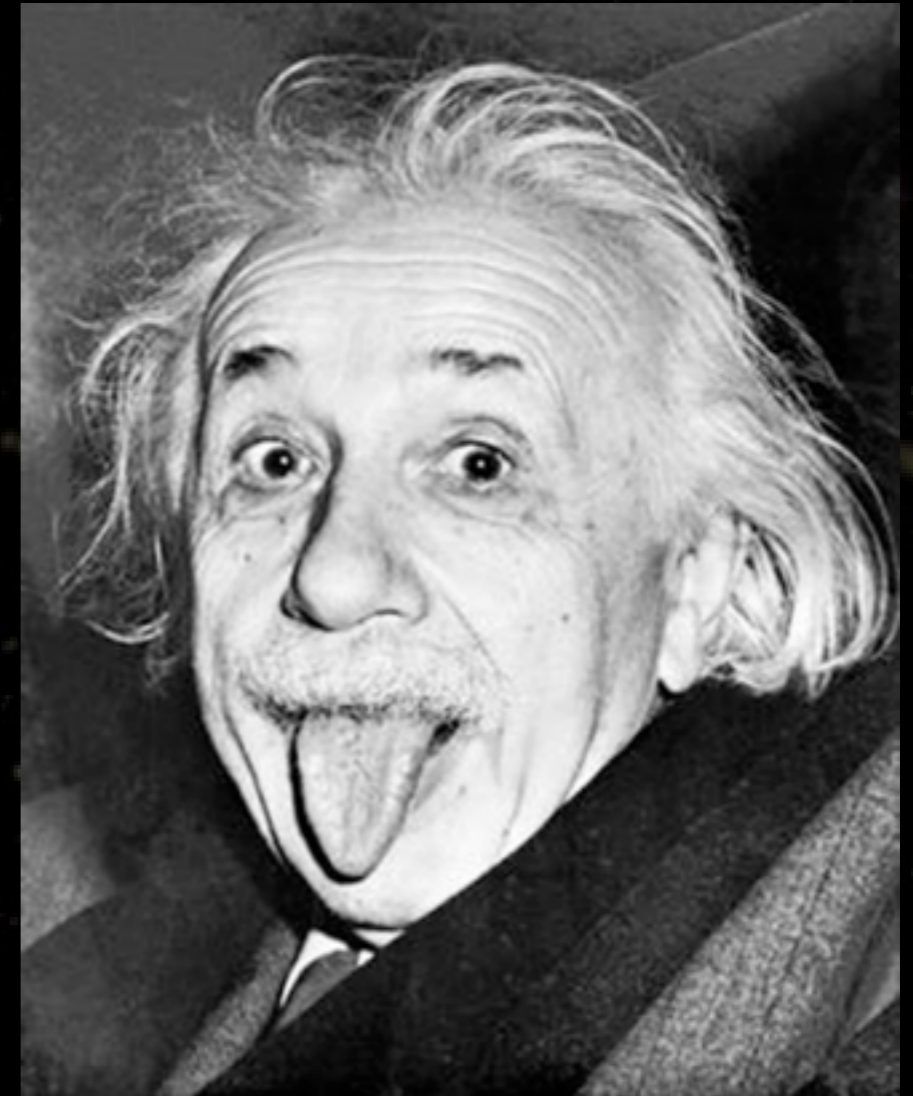


[LUX arXiv:1310.8214]



Candidats pour la matière noire

- Objets compacts
 - Trous noirs, naines brunes
 - Essentiellement exclus vers la fin des 90'
- Physique des particules
 - ★ Supersymetrie
 - modèles minimaux défavorisés par le LHC
 - détection directe (Edelweiss, CDMS, Xenon) ?
 - DAMA, COGENT, CRESST on annoncé une détection
 - ★ Dimensions supplémentaires, Axions
- Modification de la gravité
 - ★ D.M. uniquement observée via des effets gravitationnels
 - ★ MOND/TeVS ?



MOND (MODified Newtonian Dynamics)

- Nouveau principe fondamental de la dynamique $F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$
 ★ (Milgrom 1983)

- Force de Newton: $F = \frac{GMm}{r^2}$
- Orbite circulaire $a = \frac{v^2}{r}$

MOND

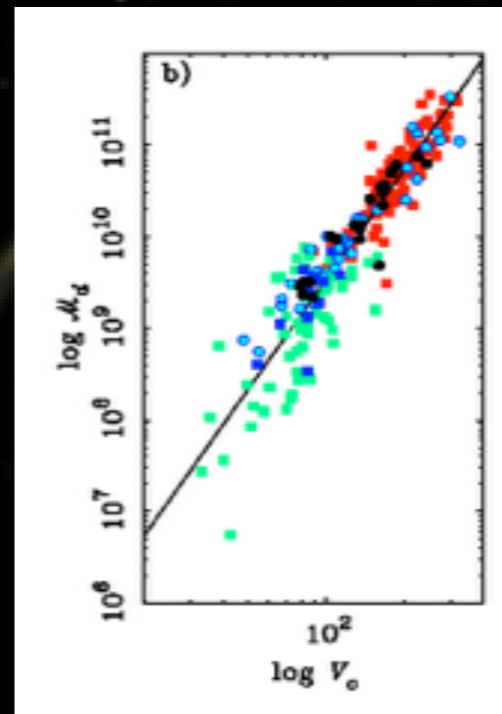
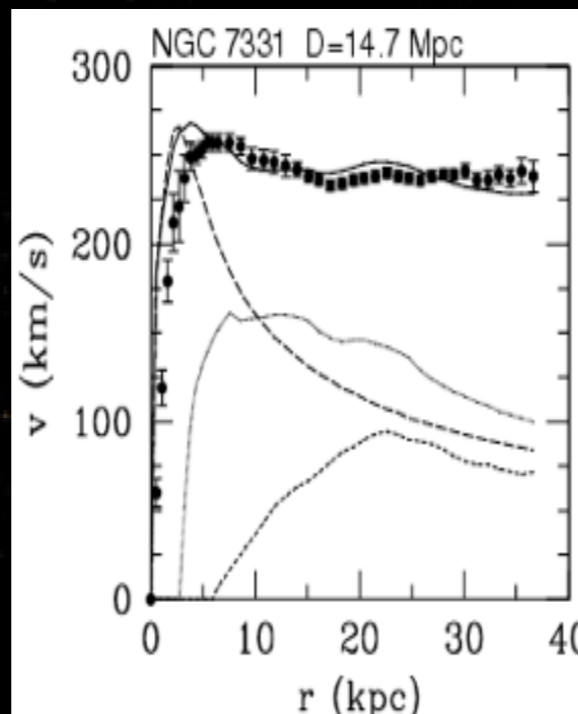
$$\Rightarrow \frac{GM}{r^2} = \frac{a^2}{a_0}$$

$$\Rightarrow a = \sqrt{GM a_0 / r}$$

$$\Rightarrow \frac{v^2}{r} = \sqrt{GM a_0 / r}$$

$$\Rightarrow v = (GM a_0)^{1/4}$$

$$\Rightarrow L \propto M \propto v^4$$



→ Courbes de rotation plates ← ~~X~~

→ Loi de Tully-Fisher ← ~~X~~

Newtonnien

$$\Rightarrow \frac{GM}{r^2} = a$$

$$\Rightarrow \frac{v^2}{r} = \sqrt{GM r^2}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

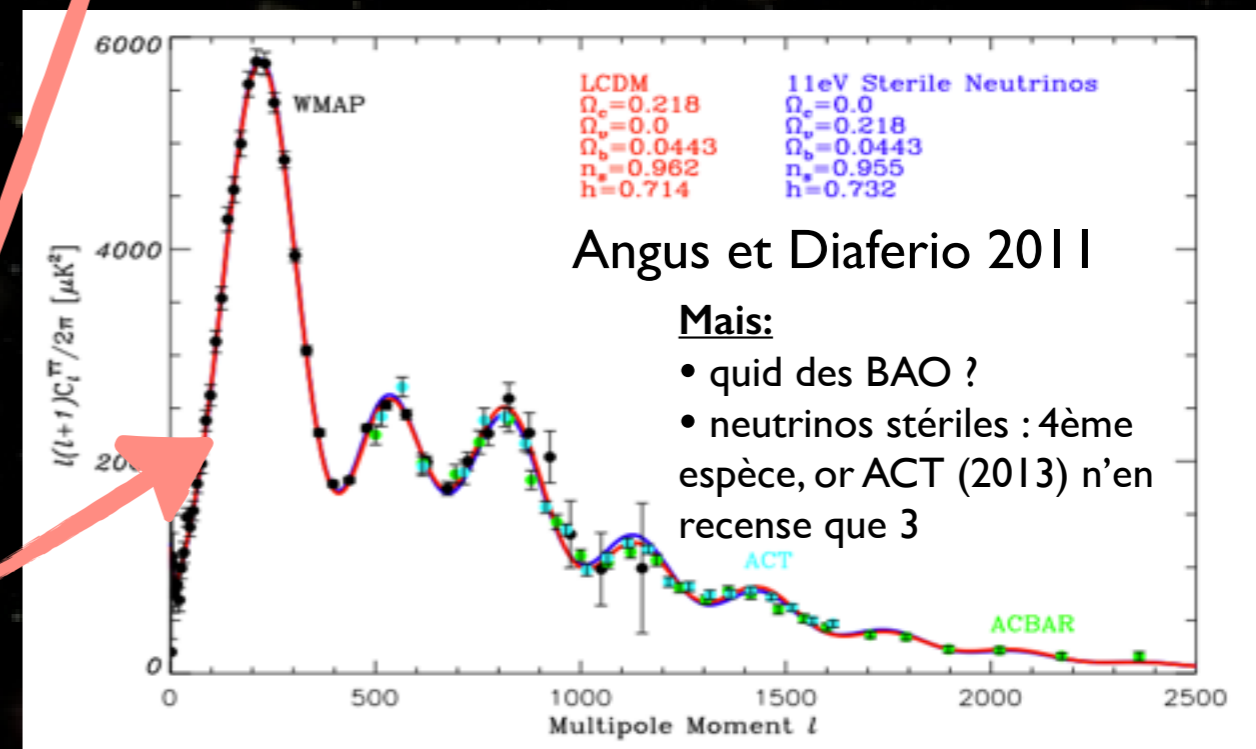
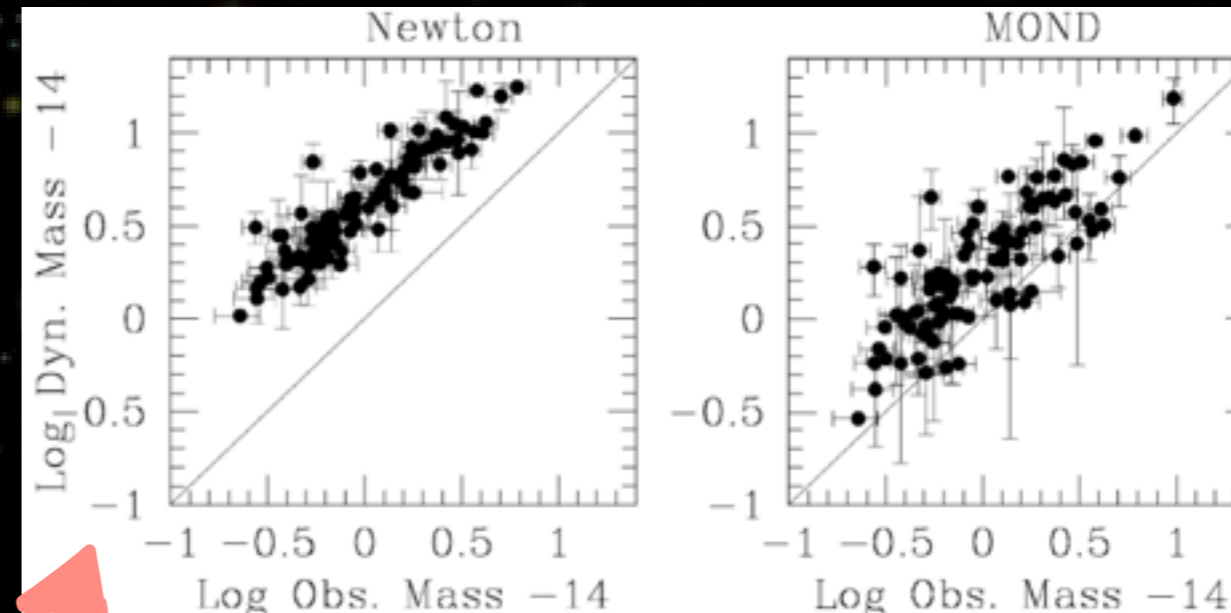
$$\Rightarrow L \propto M \propto r v^2$$

Impressionnant, mais MOND échoue sur tout le reste



Candidats pour la matière noire

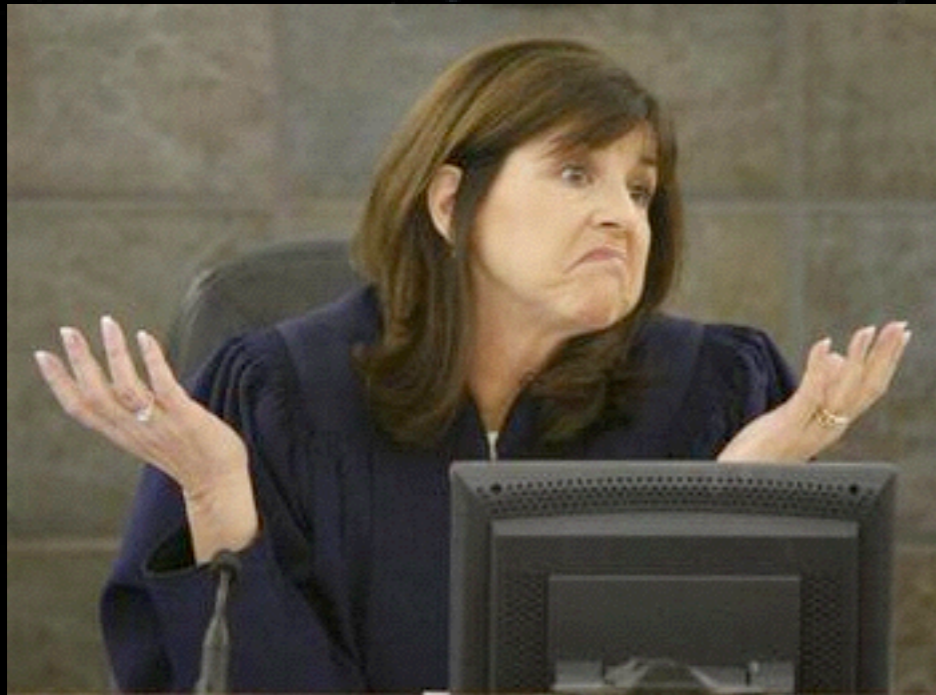
- **Objets compacts**
 - Trous noirs, naines brunes
 - Essentiellement exclus vers la fin des 90'
- **Physique des particules**
 - ★ **Supersymétrie**
 - modèles minimaux défavorisés par le LHC
 - détection directe (Edelweiss, CDMS, Xenon) ?
 - DAMA, COGENT, CRESST on annoncé une détection
 - ★ **Dimensions supplémentaires, Axions**
- **Modification de la gravité**
 - ★ **D.M. uniquement observée via des effets gravitationnels**
 - ★ **MOND/TeVS ? attractives mais ..**
 - Besoin de beaucoup de neutrinos pour expliquer les courbes de rotation et les amas
 - Franc désaccord avec le CMB et les BAO
 - aucune base théorique satisfaisante (pas de théorie «covariante»)
 - Est-ce vraiment plus «économique» que la matière noire ?



$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0^2} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$



Conclusions sur la matière noire



Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ La matière noire
 - ★ Energie sombre: Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?

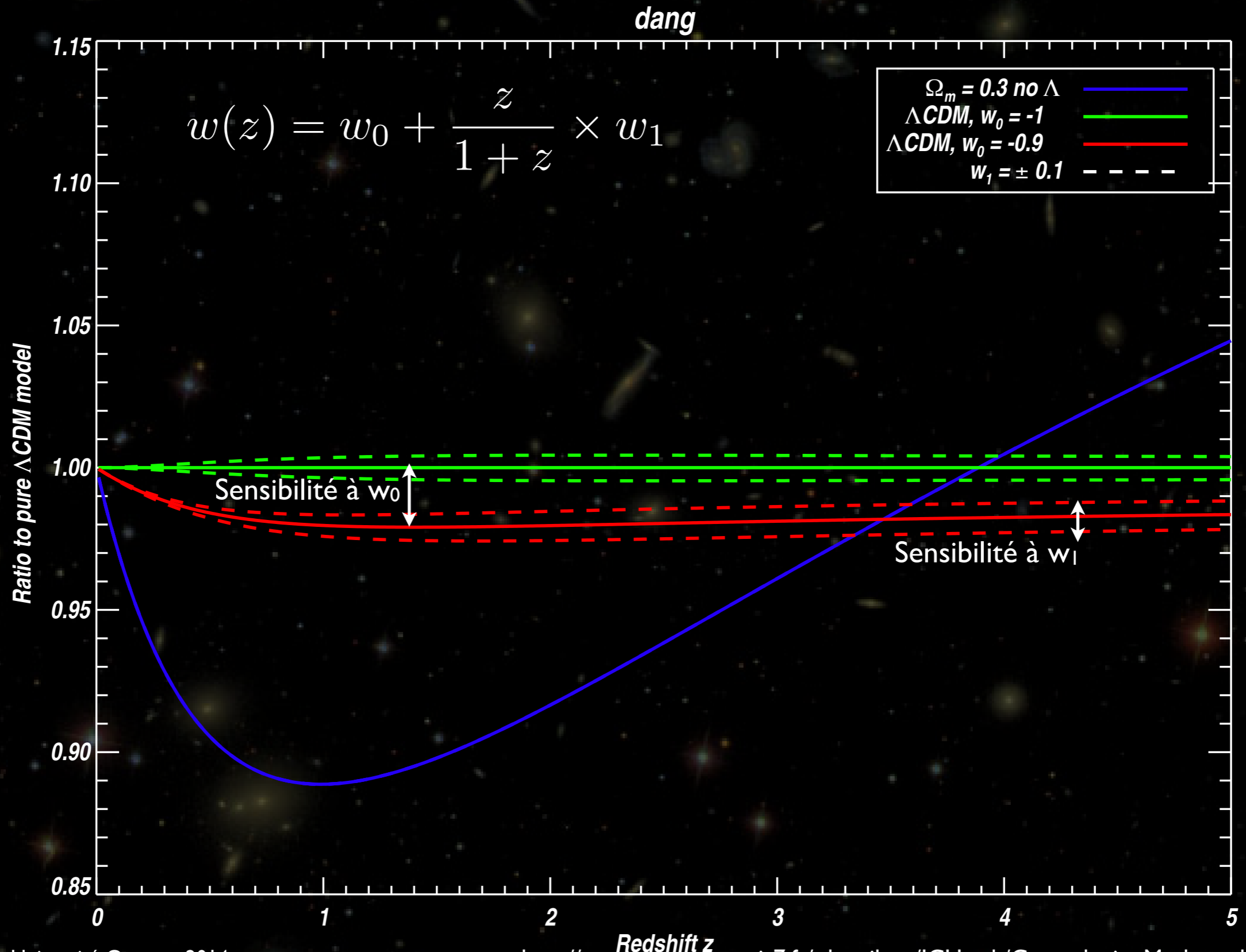


Principe des tests cosmologiques

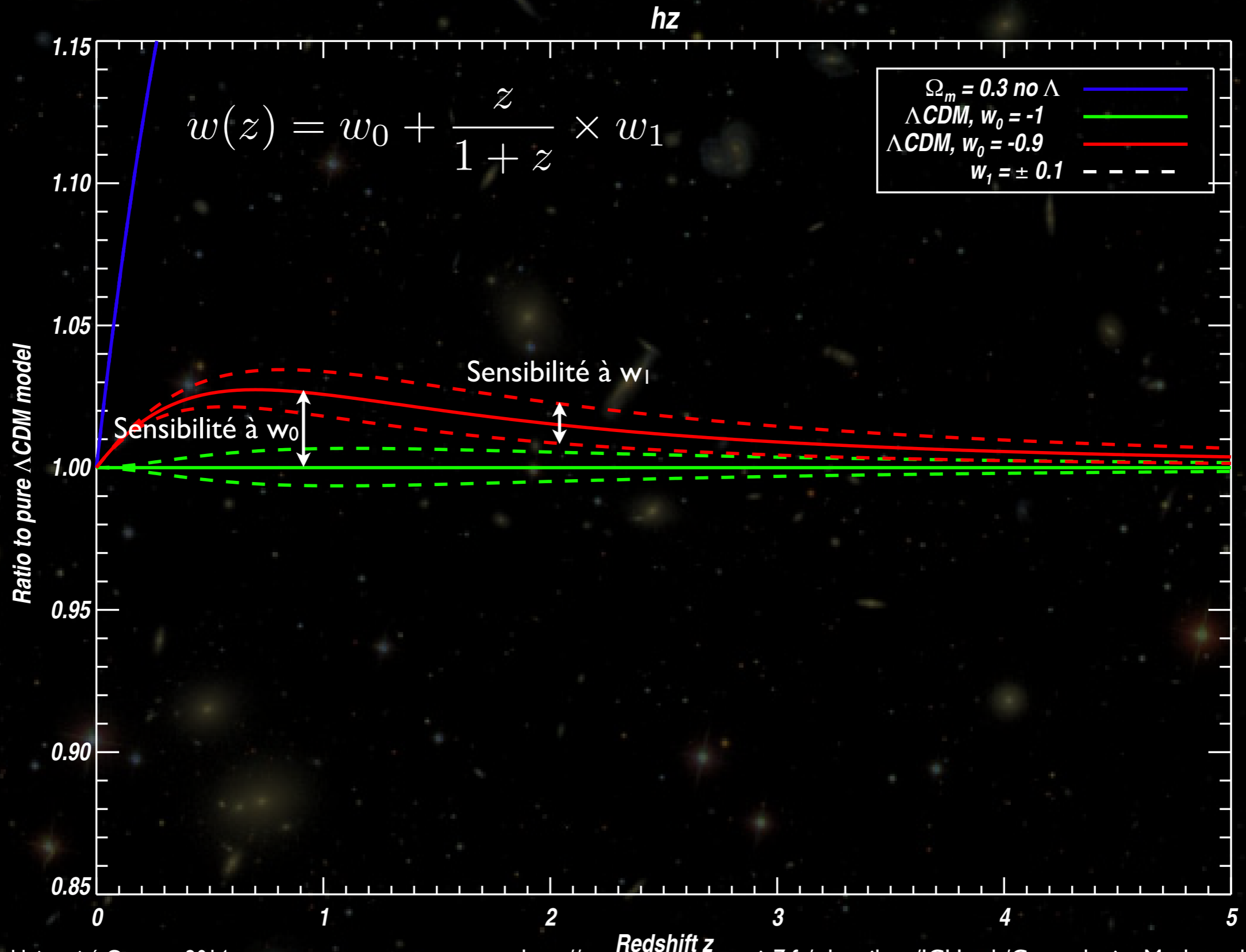
- Exploiter le fait que la relation entre distance et redshift dépend des paramètres cosmologiques
 - ★ Distance : $D(z)$ [luminosité ou angulaire]
 - ★ Épaisseur : $H(z)$
 - ★ Facteur de croissance : $Dg(z)$
 - Si on dispose de :
 - ★ Chandelle standard (luminosité intrinsèque connue)
 - ★ Étalon de distance standard
 - ★ Densité d'objets standard
 - On mesure ces observables à différents redshifts et on ajuste la cosmologie
 - ★ SNIa : $D_l(z)$ à $z < 1$
 - ★ BAO : $D_a(z)$ transversalement et $H(z)$ radialement à $0.3 < z < 1$ et $2 < z < 2.5$
 - ★ Comptage d'amas : $D_p^2(z)/H(z)$ et $g(z)$ à $z \sim 0.6 - 1$
 - ★ Weak lensing : $D_p(z)$ et $Dg(z)$ à $z \sim 1$
- ➔ Une large part de la difficulté est de trouver des standards
- ★ Évolution des systèmes sur les échelles de temps concernées (bras de levier en z)
 - ★ Variation intrinsèque des phénomènes astrophysiques (complexes, grand nombre de degrés de liberté non observables)



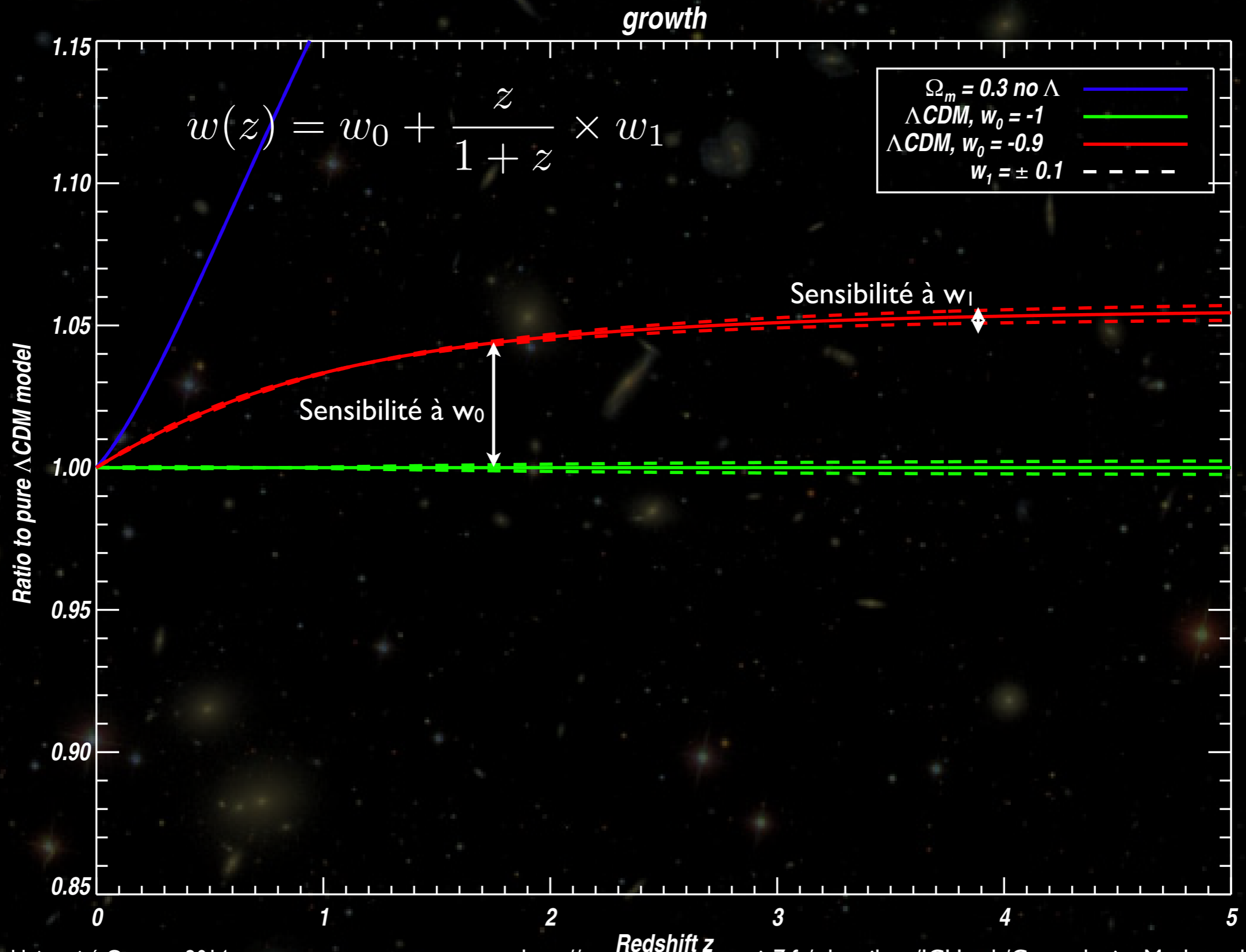
Distances et Énergie Sombre



H(z) et Énergie Sombre



Facteur de croissance



Tests pour l'énergie sombre

- SNIa
- Soustraction cosmique
- BAO
- Weak-Lensing
- Effet ISW

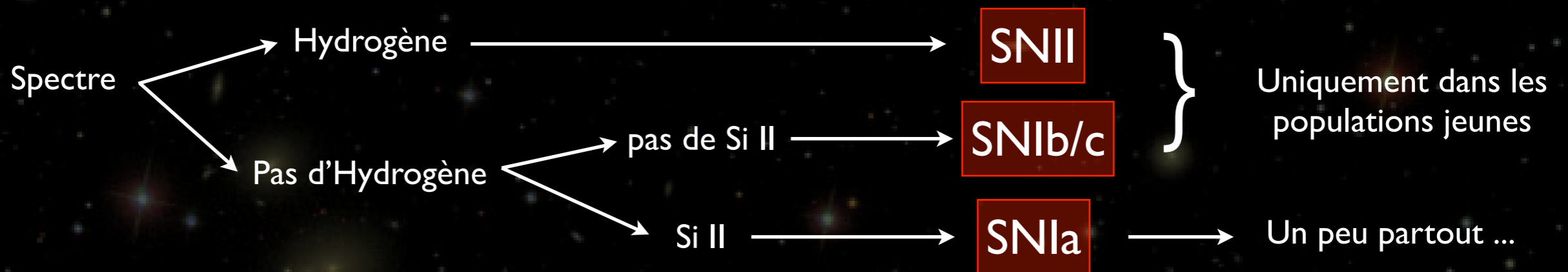


Les Supernovae de type Ia

- «Stella Nova» (Kepler) aussi brillante qu'une galaxie toute entière
 - ➔ Visible de très loin !
 - ➔ rare ~ qqes / galaxie / siècle

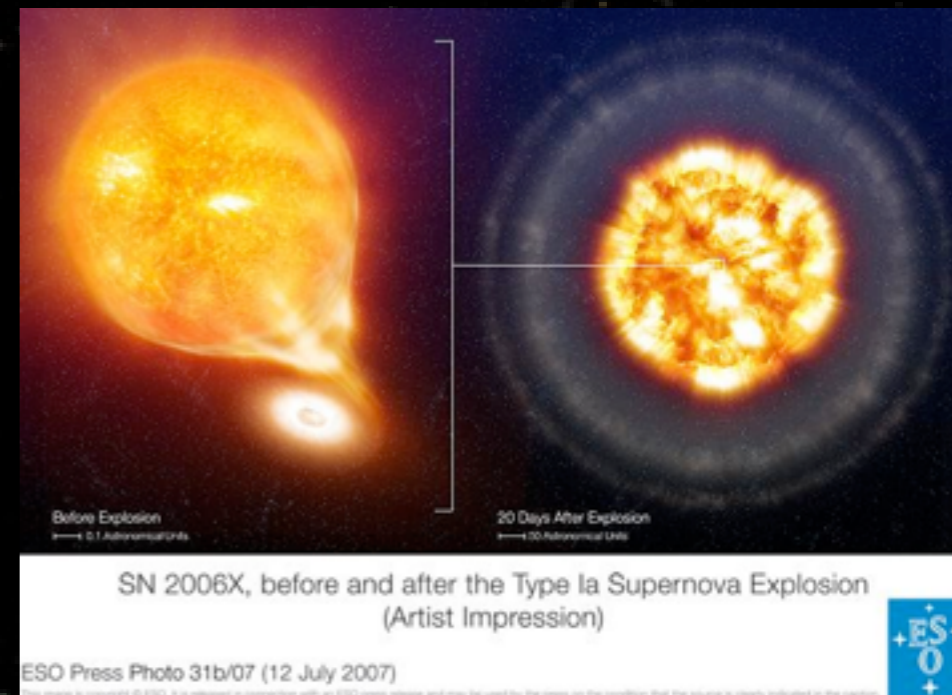
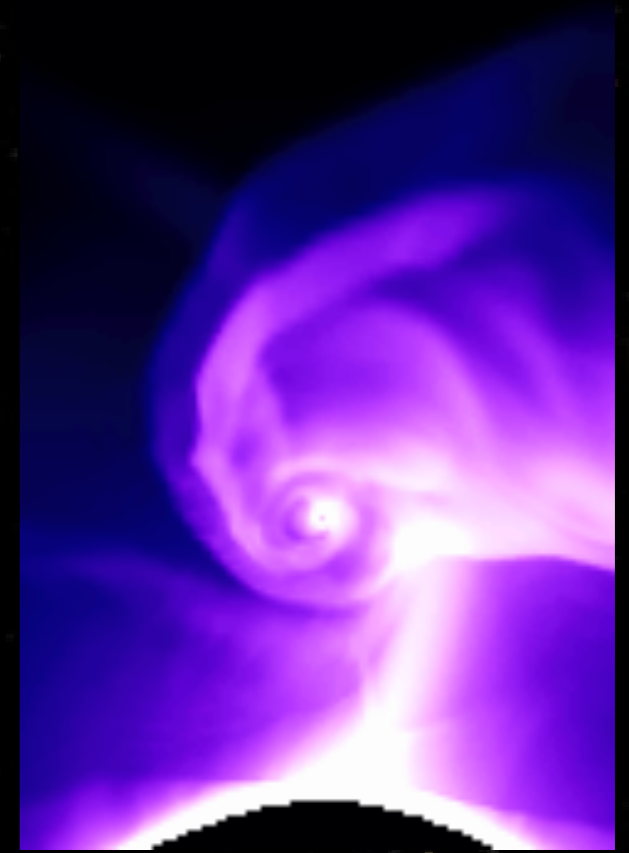


- Explosion stellaire



Modèle de Supernovae

- SNIi et SNIb/c : Effondrement d'une étoile massive (jeune) «core-collapse»
- SNIa : Explosion thermonucléaire d'une naine blanche d'un système binaire
 - ▶ La naine blanche a consommé tout son hydrogène et n'est «retenue» que par la pression quantique du gaz d'électrons : stable uniquement si $M < M_{ch}$ ($1.44 M_{\odot}$)
 - ▶ La naine blanche phagocyte son compagnon : sa masse augmente
 - ▶ Au delà de M_{ch} , explosion thermonucléaire :
 - Au centre les noyaux (C, O) sont incinérés et forment du Fe et Ni
 - À la périphérie la matière est éjectée en brûlant et en

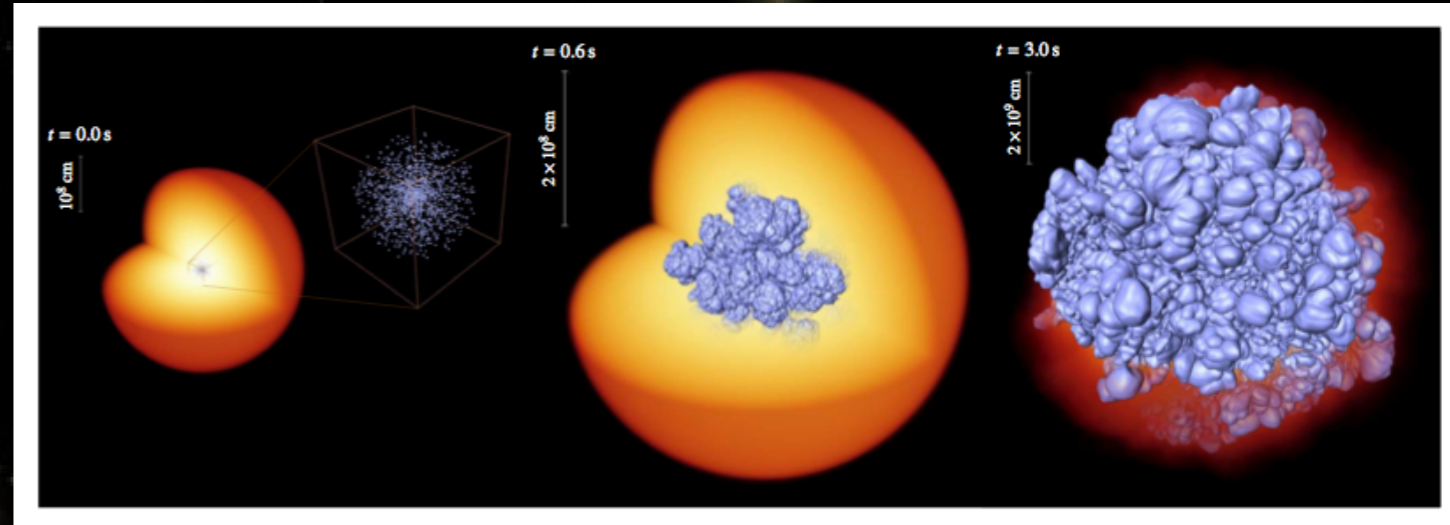


SNIa

Röpke (2006)

- Physique de l'explosion mal comprise

- ★ mode d'ignition ?
- ★ Détonation (supersonique) ?
- ★ Déflagration (subsonique) ?

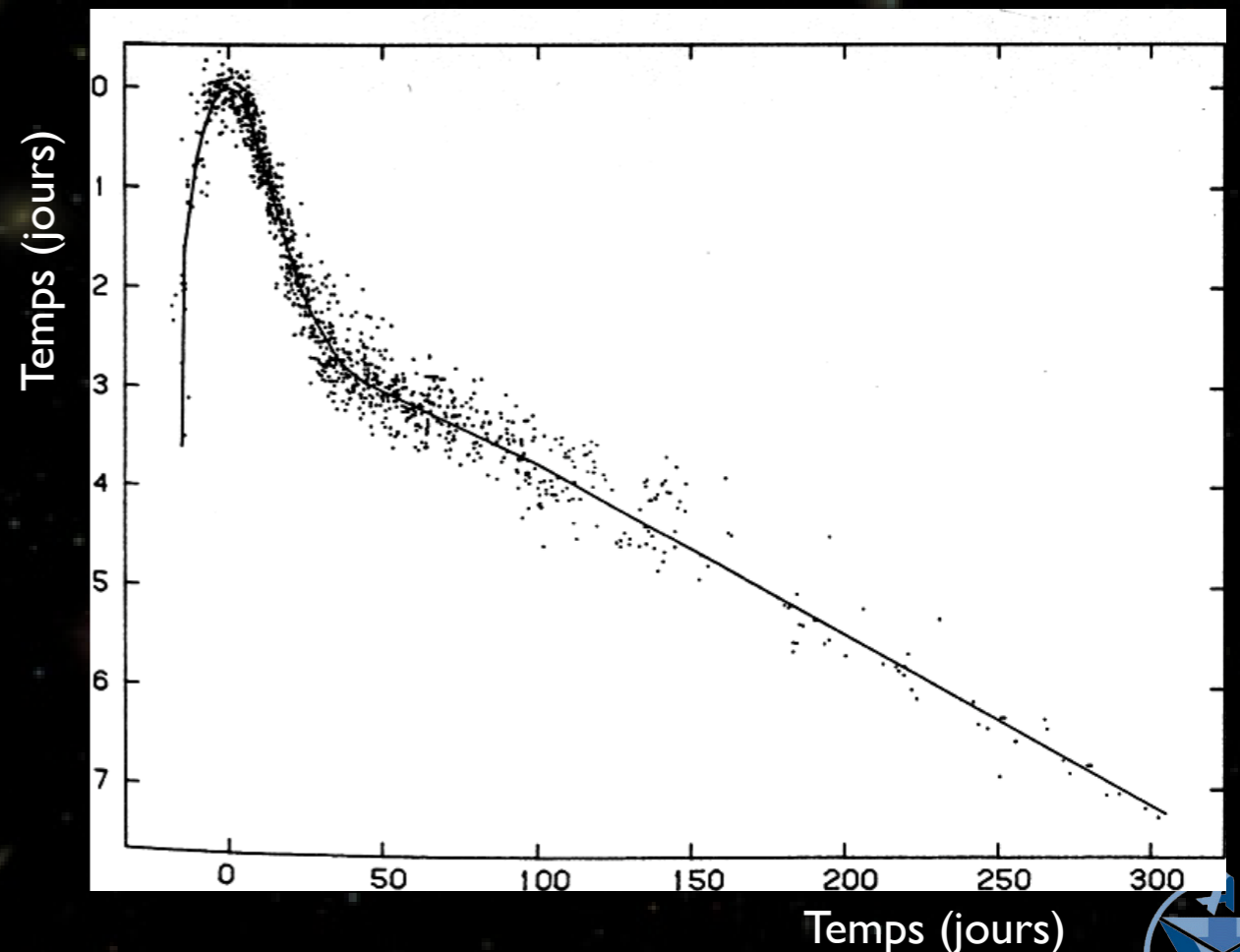


- L'explosion produit une large quantité de ^{56}Ni

- ★ Désintégration : $\sim 15j$
- ★ Suivi de Cobalt : \sim plusieurs mois

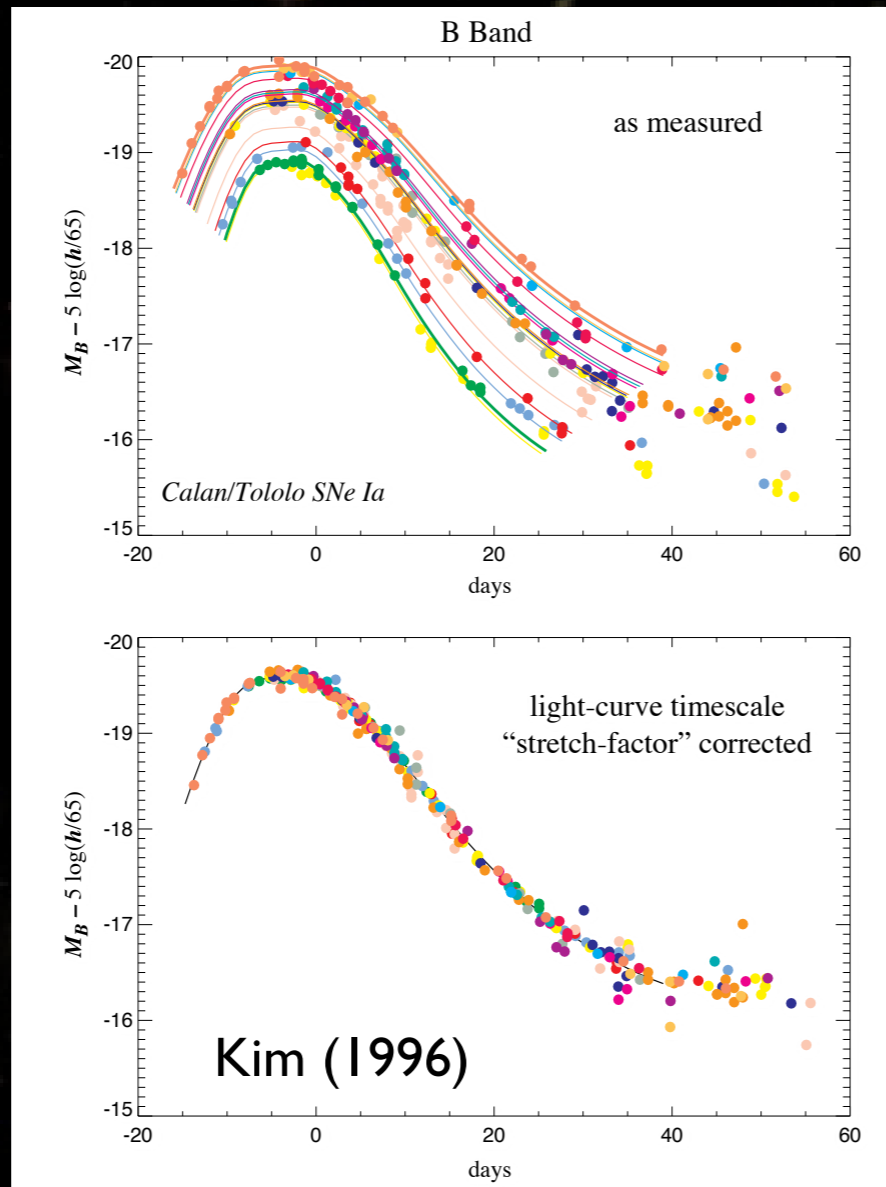
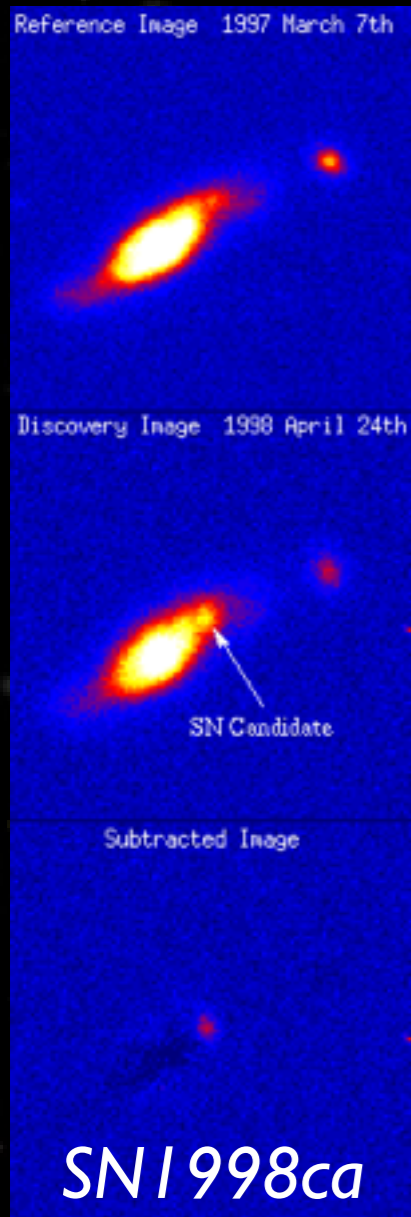
- La masse est toujours la même

- ★ On attend une grande homogénéité



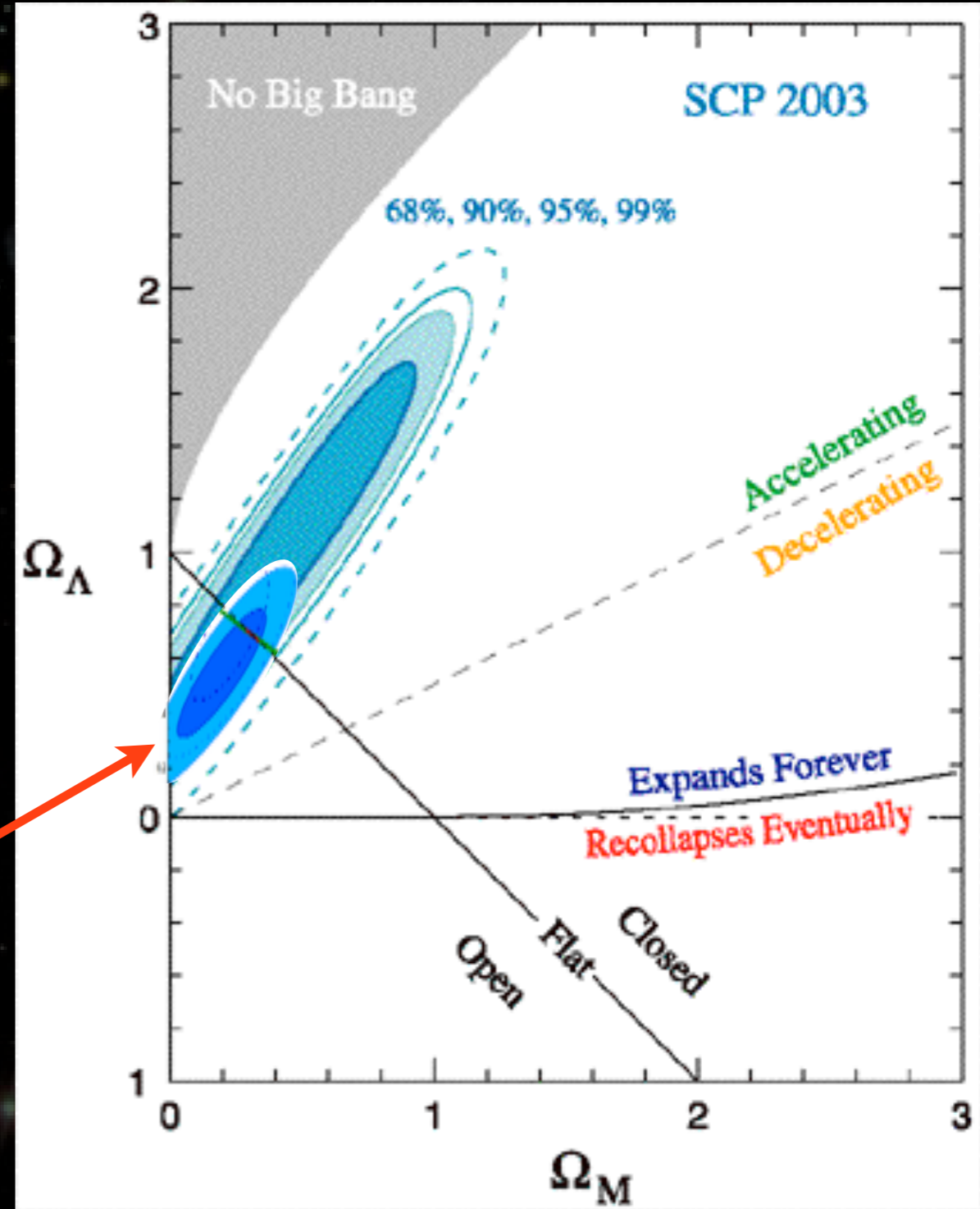
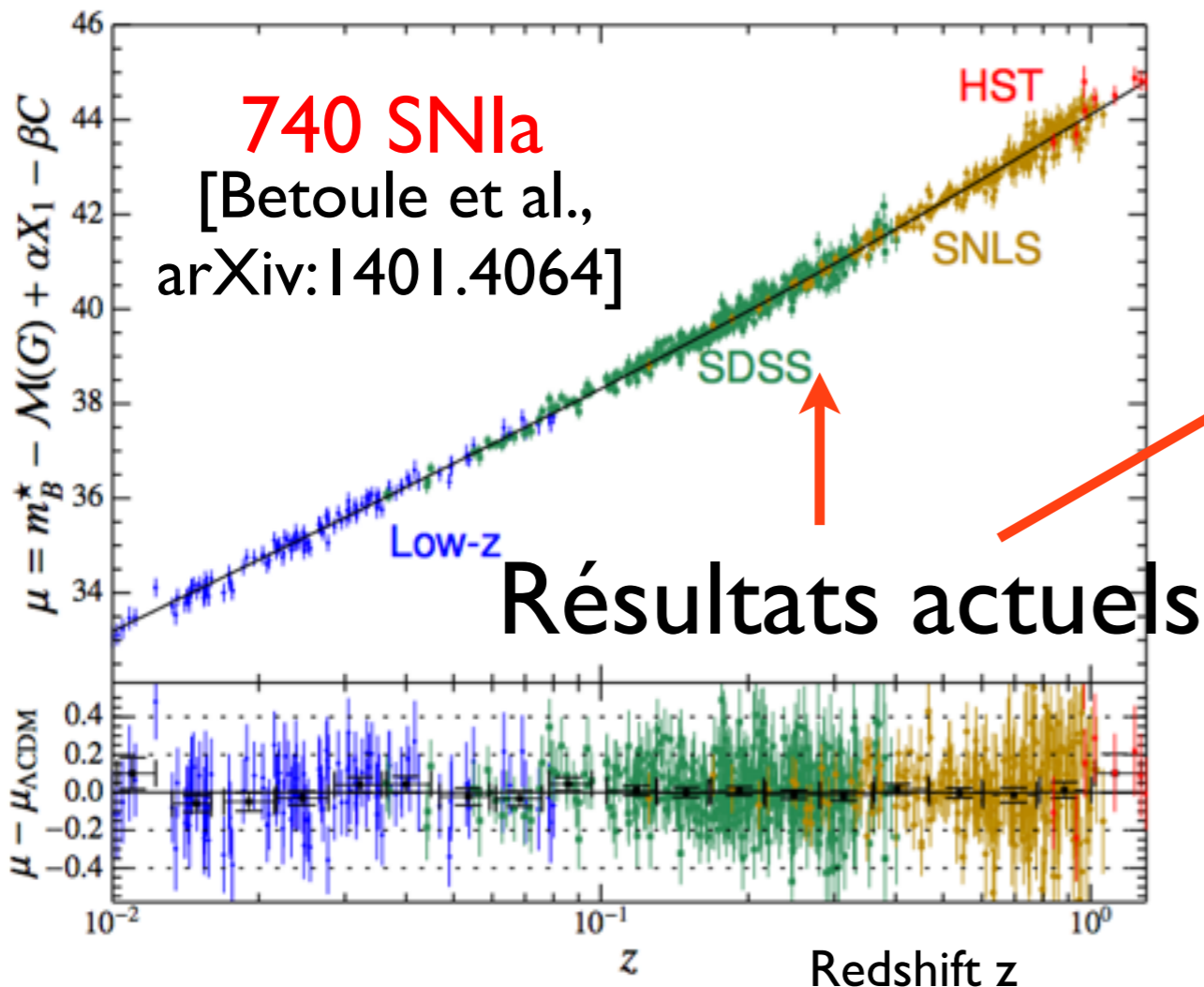
Supernovae de type Ia (SNIa) : Chandelles standard

- Très lumineuses (plus que leur galaxie): visibles de loin
- Luminosité au maximum standardisable



«Découverte» de Λ : 1998

- Deux équipes :
 - ★ SCP : Perlmutter et al.
 - ★ High-z : Riess et al.
- Prix Nobel 2011
 - ★ Perlmutter, Riess, Schmidt



En fait l'idée trainait déjà...

Letters to Nature

Nature **348**, 705-707 (27 December 1990) | doi:10.1038/348705a0; Accepted 31 October 1990

The cosmological constant and cold dark matter

G. Efstathiou, W. J. Sutherland & S. J. Maddox

1. Department of Physics, University of Oxford, Oxford OX1 3RH, UK

THE cold dark matter (CDM) model¹⁻⁴ for the formation and distribution of galaxies in a universe with exactly the critical density is theoretically appealing and has proved to be durable, but recent work⁵⁻⁸ suggests that there is more cosmological structure on very large scales ($l > 10 h^{-1} \text{ Mpc}$, where h is the Hubble constant H_0 in units of $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) than simple versions of the CDM theory predict. We argue here that the successes of the CDM theory can be retained and the new observations accommodated in a spatially flat cosmology in which as much as 80% of the critical density is provided by a positive cosmological constant, which is dynamically equivalent to endowing the vacuum with a non-zero energy density. In such a universe, expansion was dominated by CDM until a recent epoch, but is now governed by the cosmological constant. As well as explaining large-scale structure, a cosmological constant can account for the lack of fluctuations in the microwave background and the large number of certain kinds of object found at high redshift.

ARTICLE TOOLS

- Send to a friend
- Export citation
- Export references
- Rights and permissions
- Order commercial reprints
- Bookmark in Connotea

SEARCH PUBMED FOR

- G. Efstathiou
- W. J. Sutherland
- S. J. Maddox



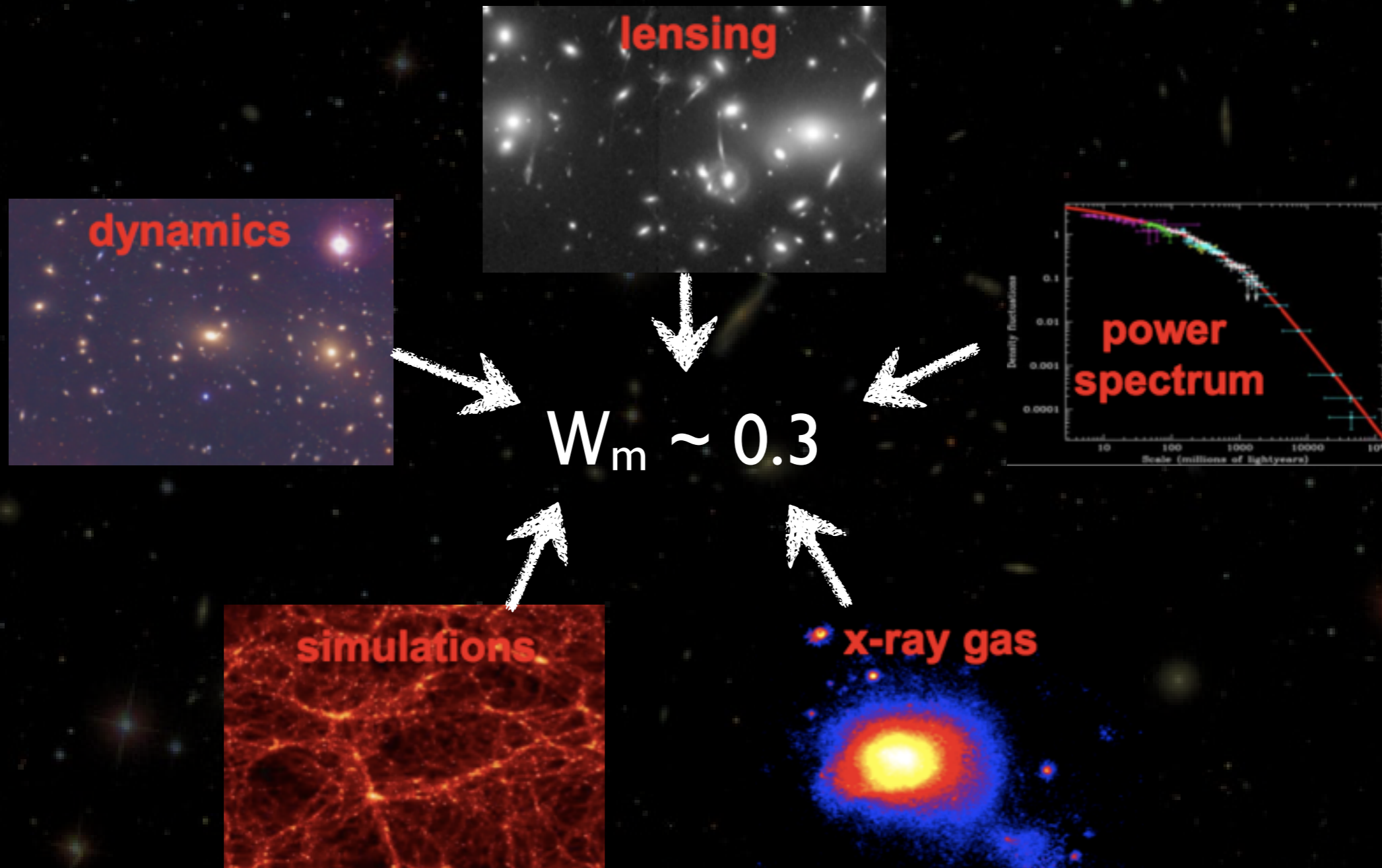
Tests pour l'énergie sombre

- SNIa
- Soustraction cosmique
- BAO
- Weak-Lensing
- Effet ISW



Soustraction Cosmique

- Diverses observations montrent que $W_m=0.3$



Soustraction Cosmique

$$\Omega_{\text{tot}} \rightarrow 1 - 0.3 = 0.7 \leftarrow \Omega_{\Lambda} ?$$

Ω_m



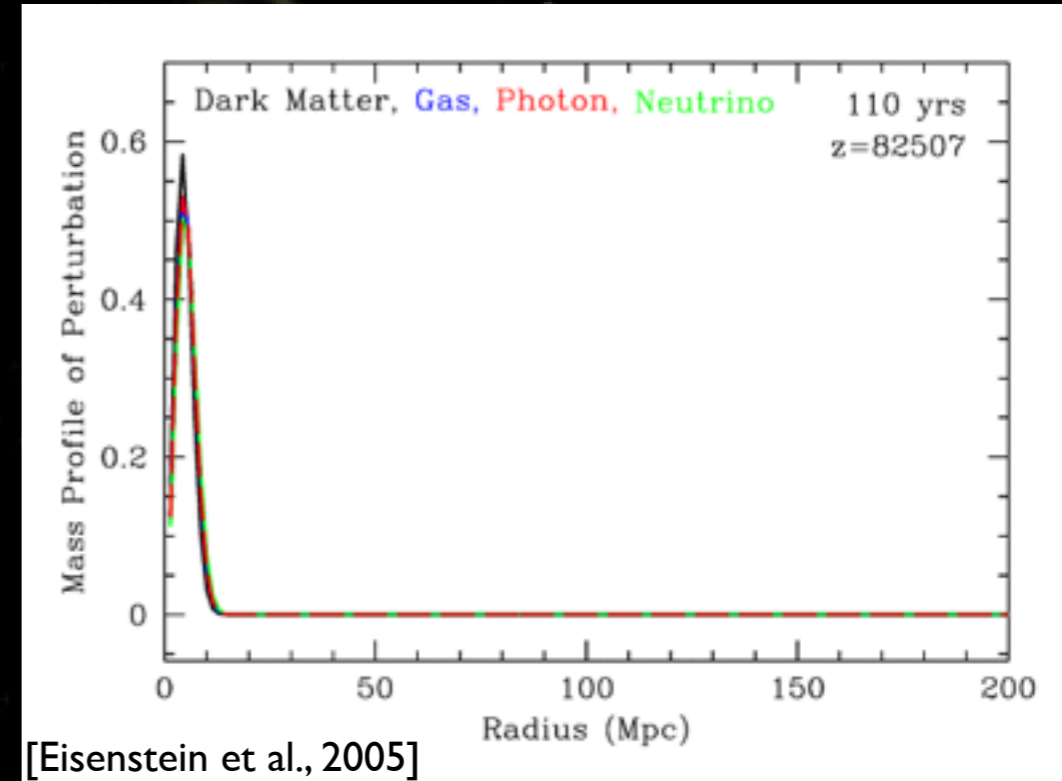
Tests pour l'énergie sombre

- SNIa
- Soustraction cosmique
- BAO
- Weak-Lensing
- Effet ISW



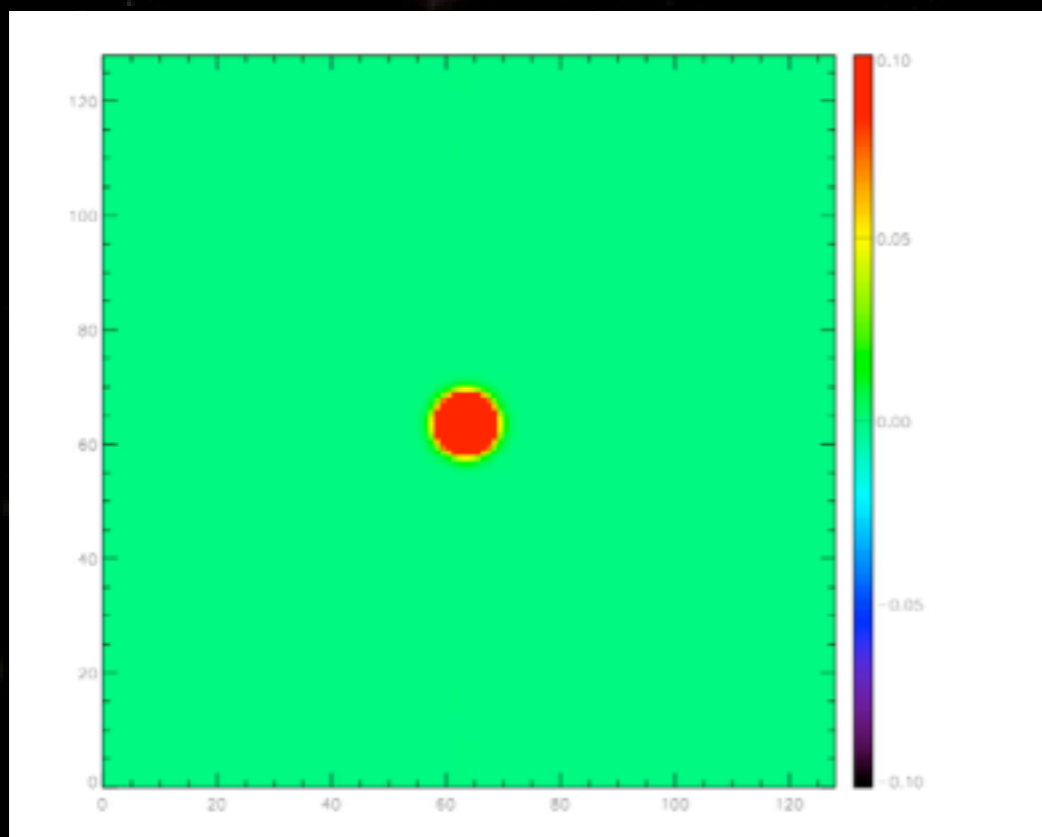
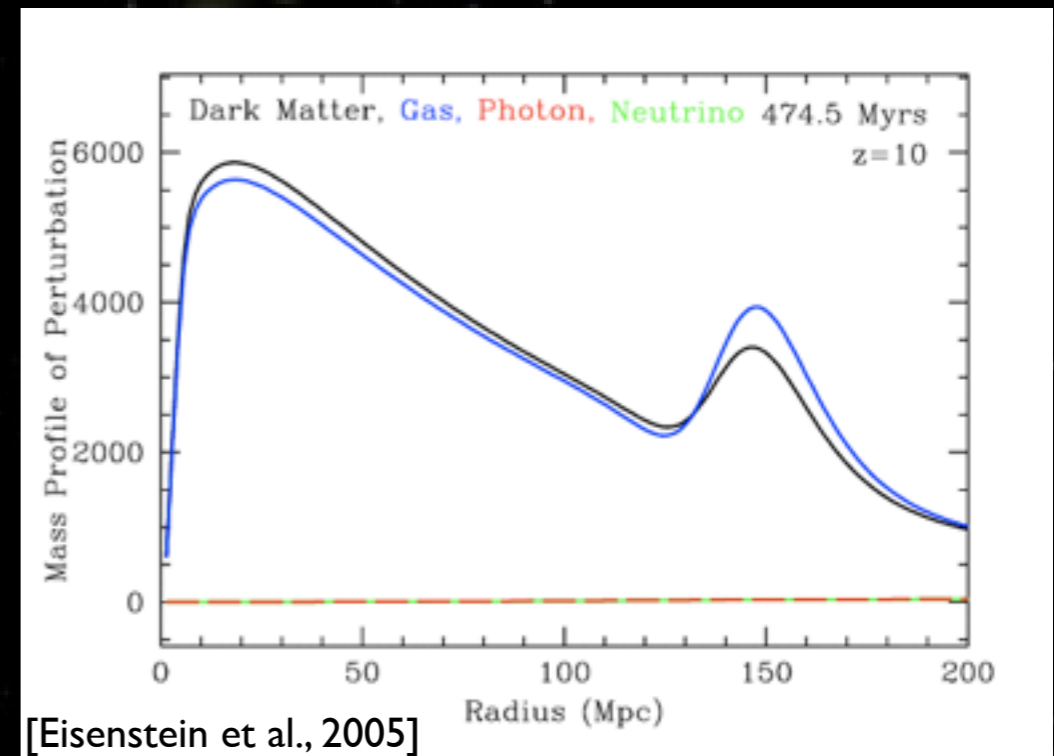
Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

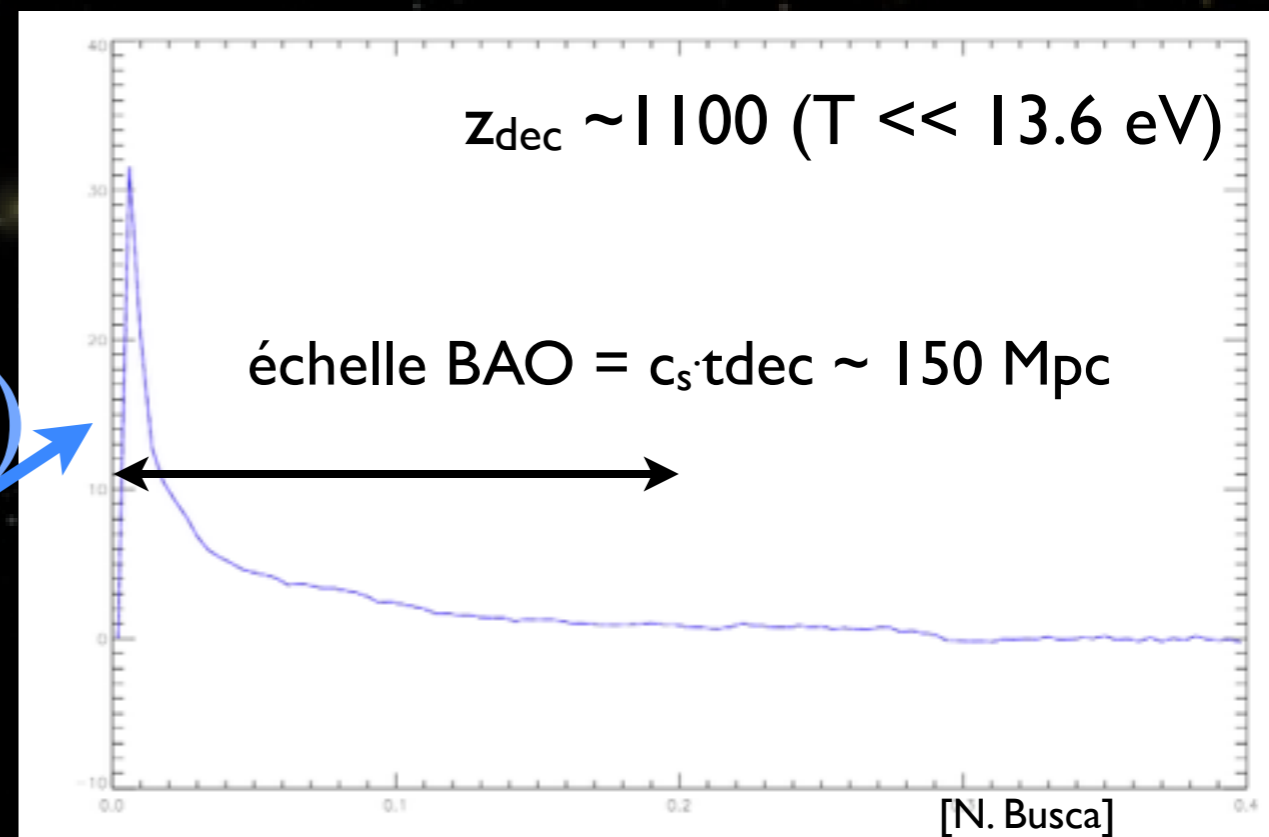


Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

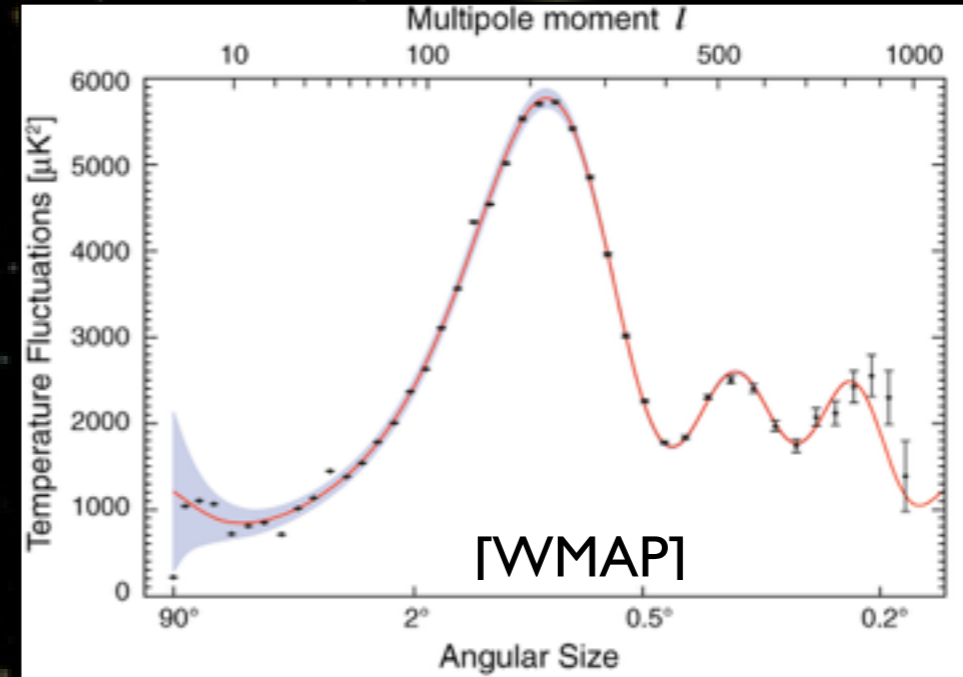
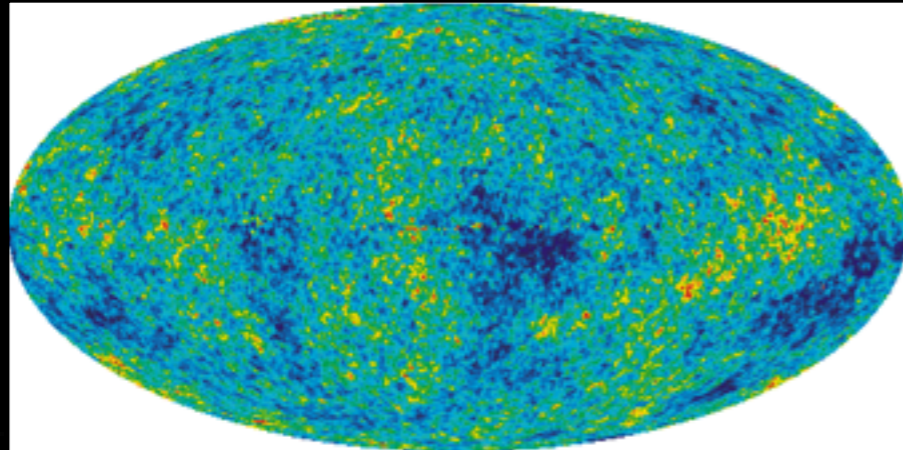


$\xi(r)$

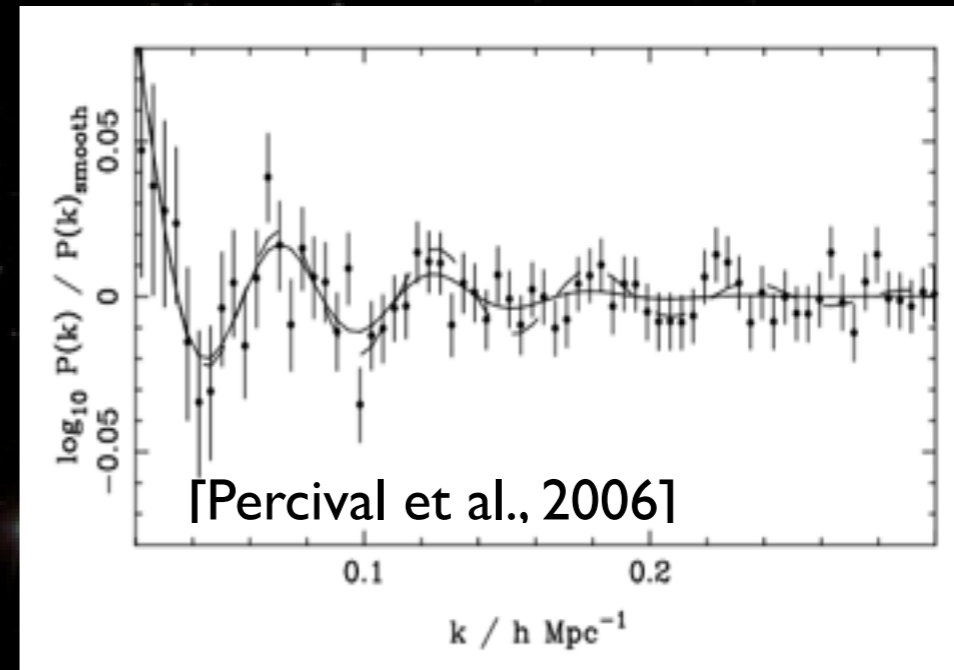
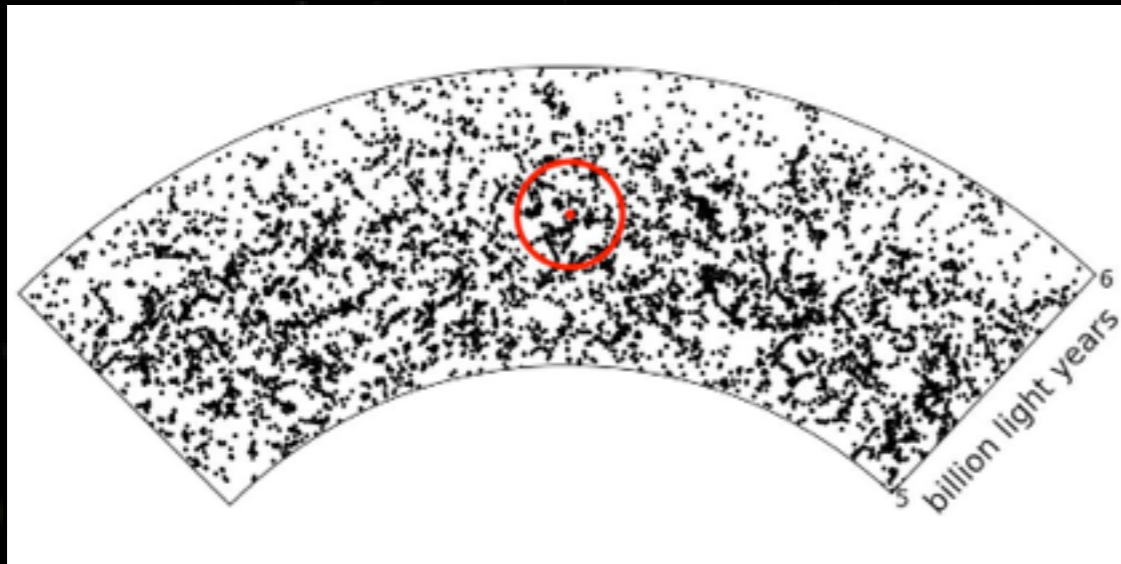


Observations des BAO

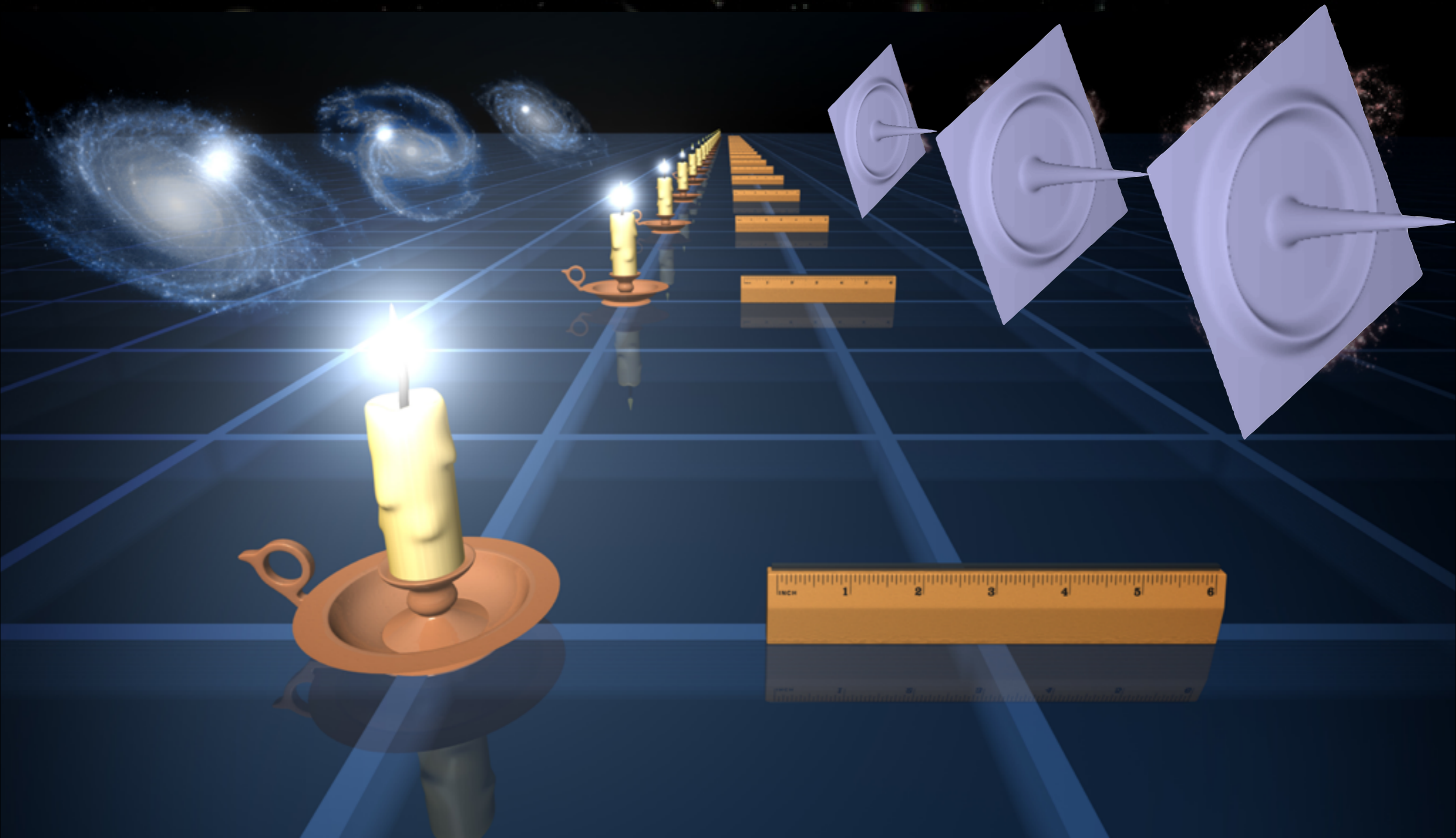
- CMB



- Galaxies



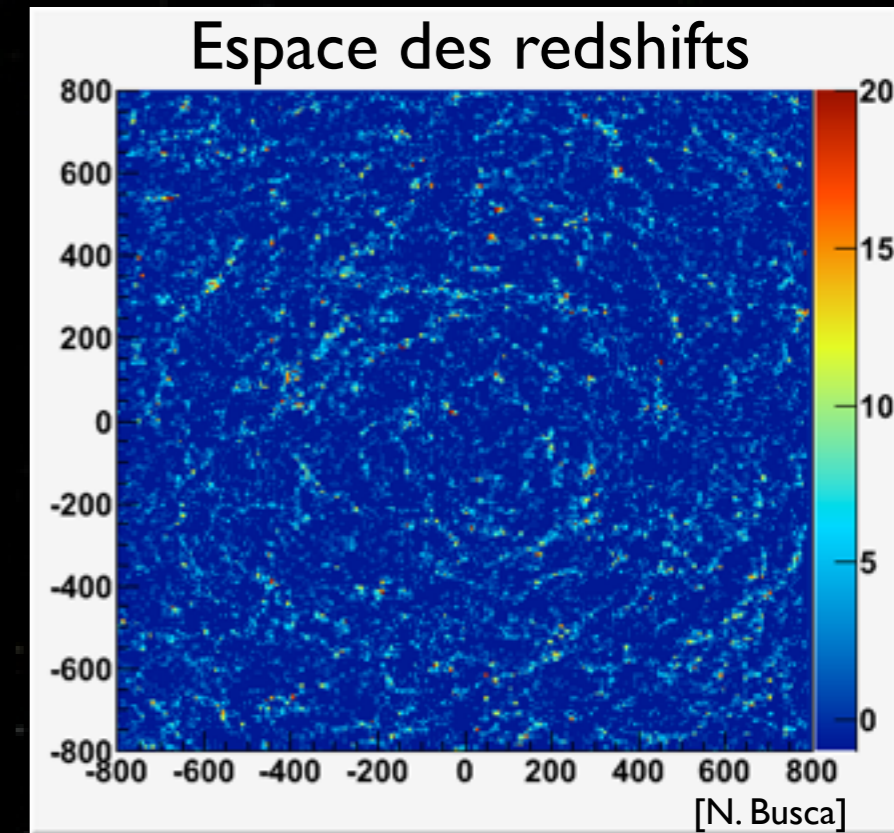
BAO: Règle standard



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

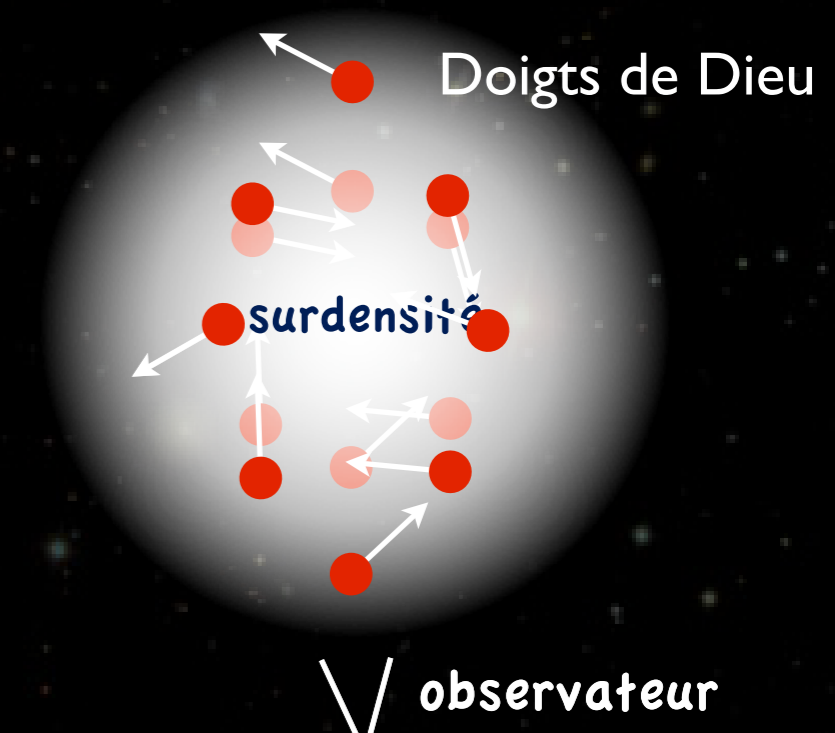
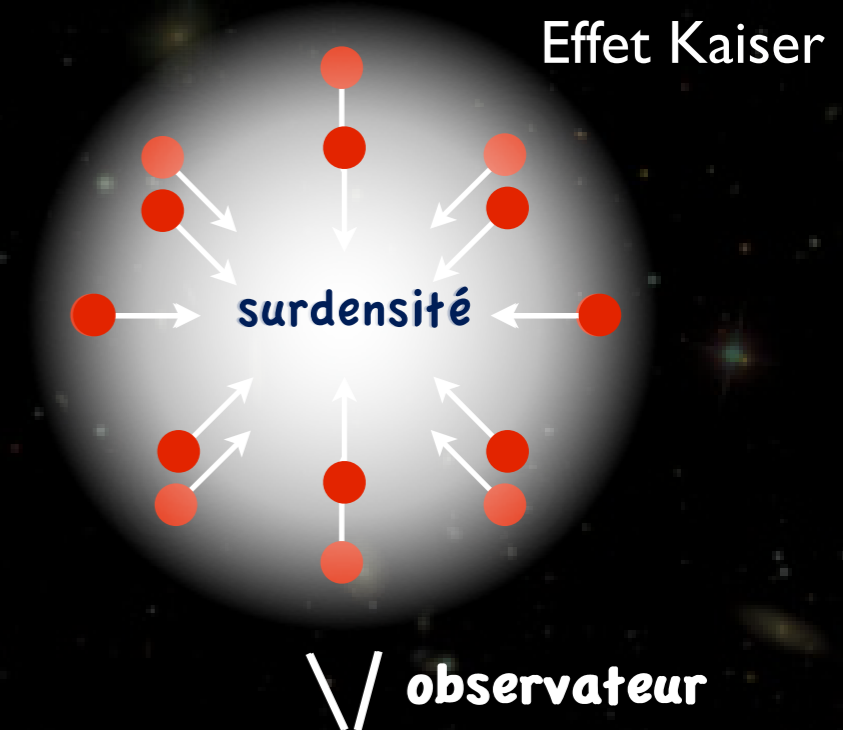
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, φ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

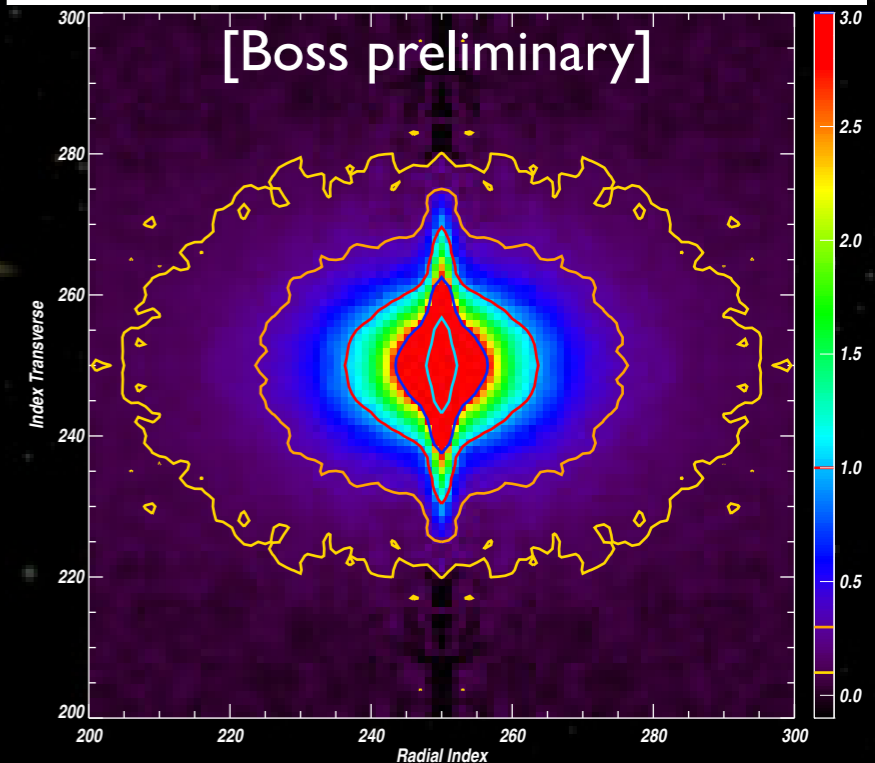
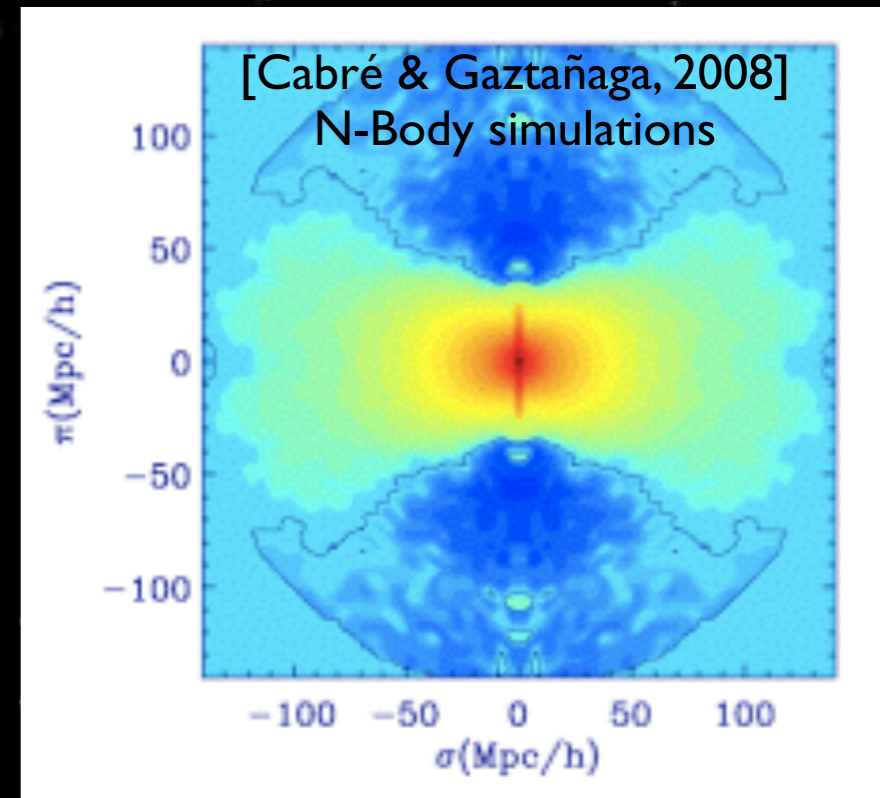
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, φ, z)
- ★ z est affecté de distorsions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, φ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies

- ★ On mesure (θ, φ, z)

- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$

- Effet Kaiser (grandes échelles):

- chute des galaxies dans les potentiels de DM
- Augmente le rapport S/N du clustering

- Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):

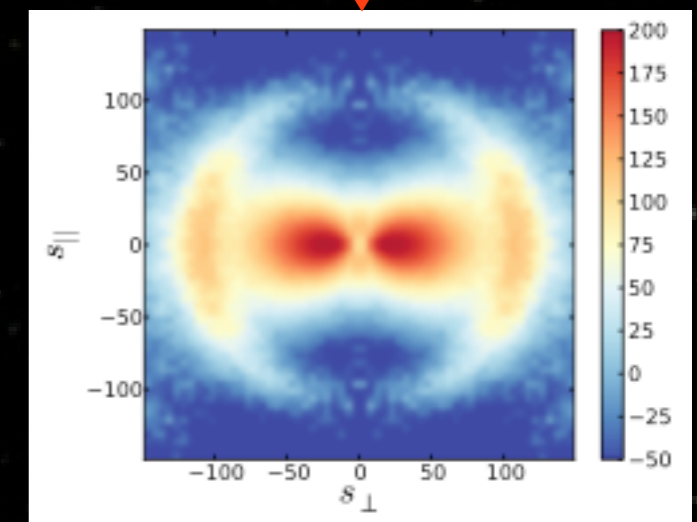
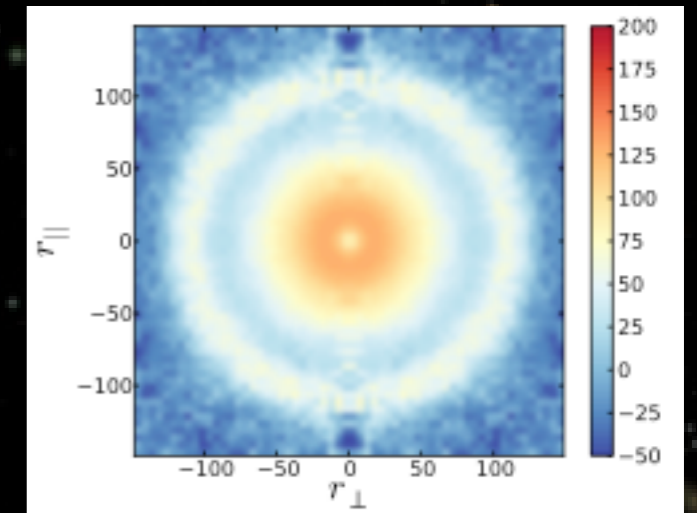
- Vitesses aléatoires des galaxies

- ★ Non linéarités:

- effondrement gravitationnel non linéaire: lisse les structures aux petites échelles et à bas z

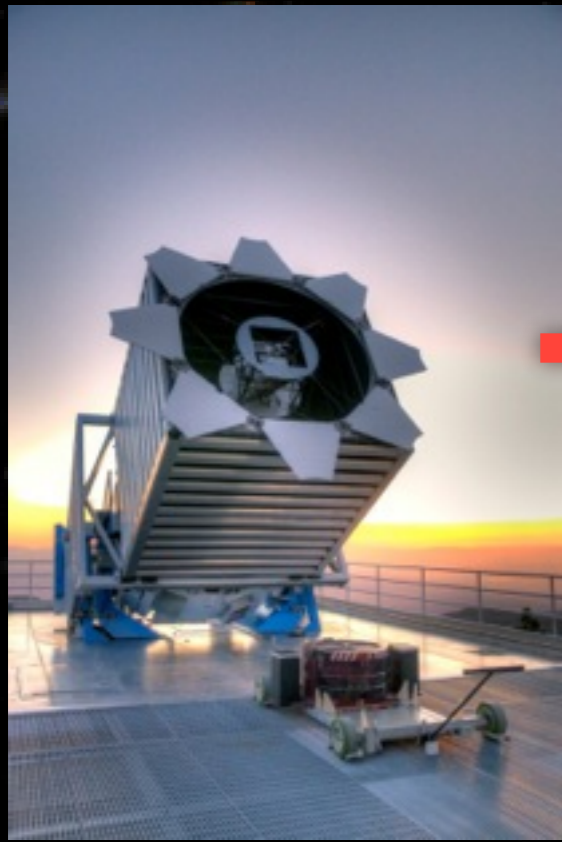
- ★ Tout cela complique l'analyse...

Non linéarités:
[Padmanabhan et al., 2012]

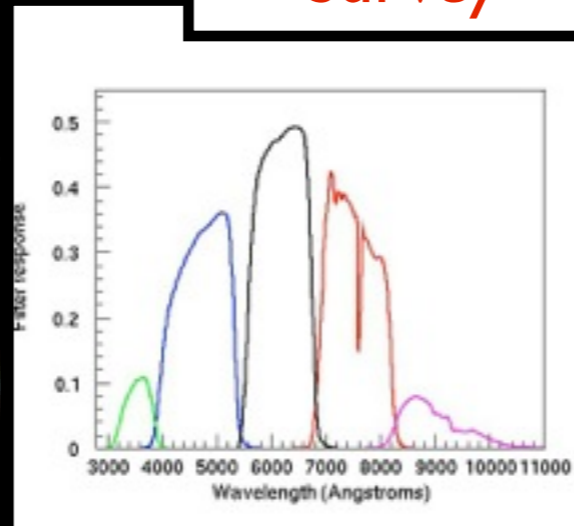


Non linéarités + RSD

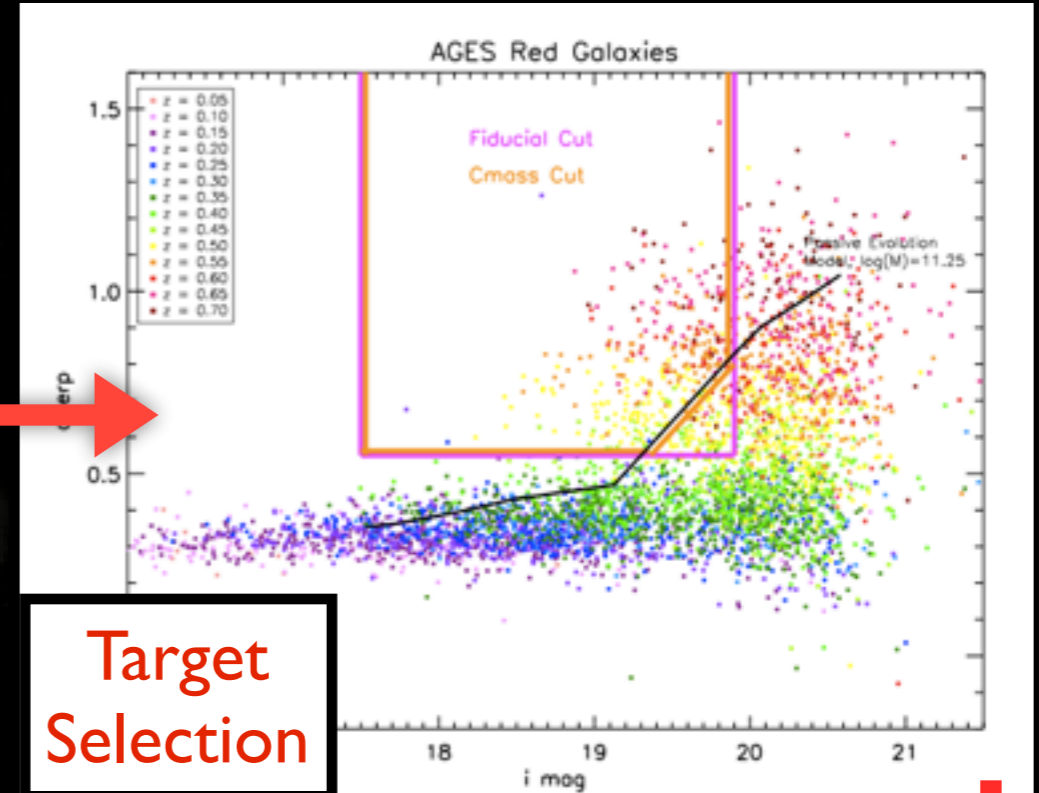




Photometric Survey

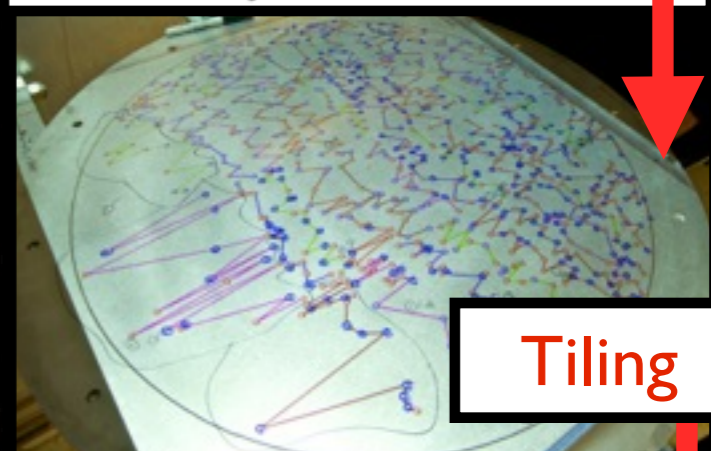


Target Selection

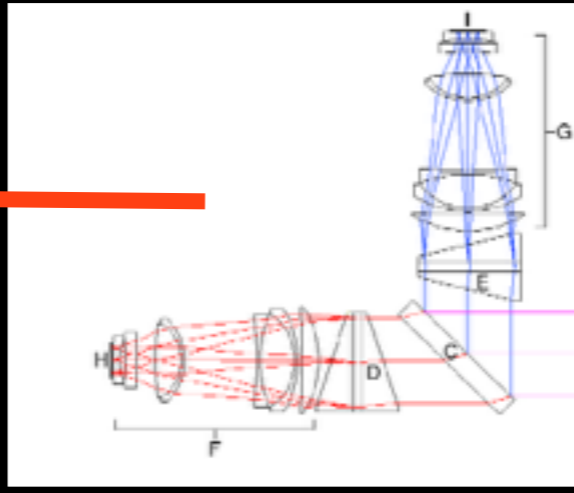
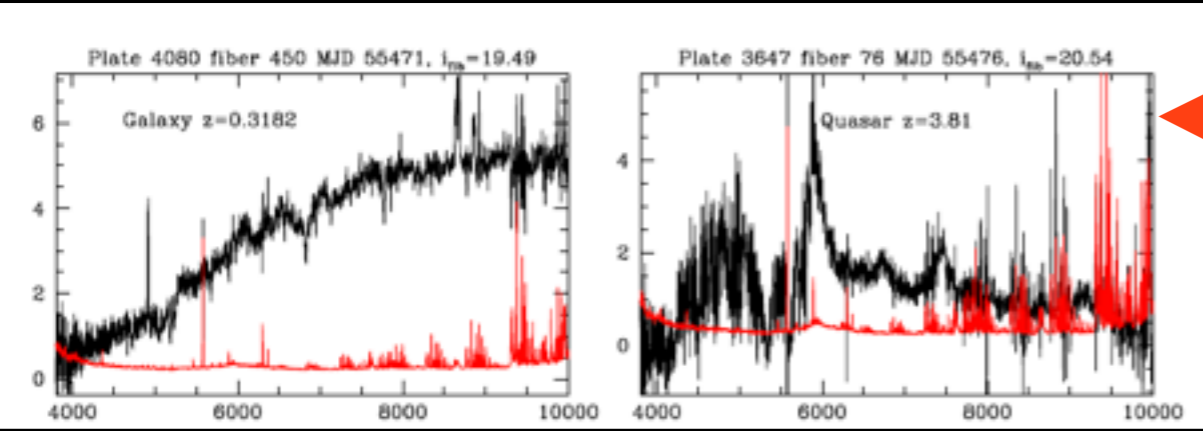


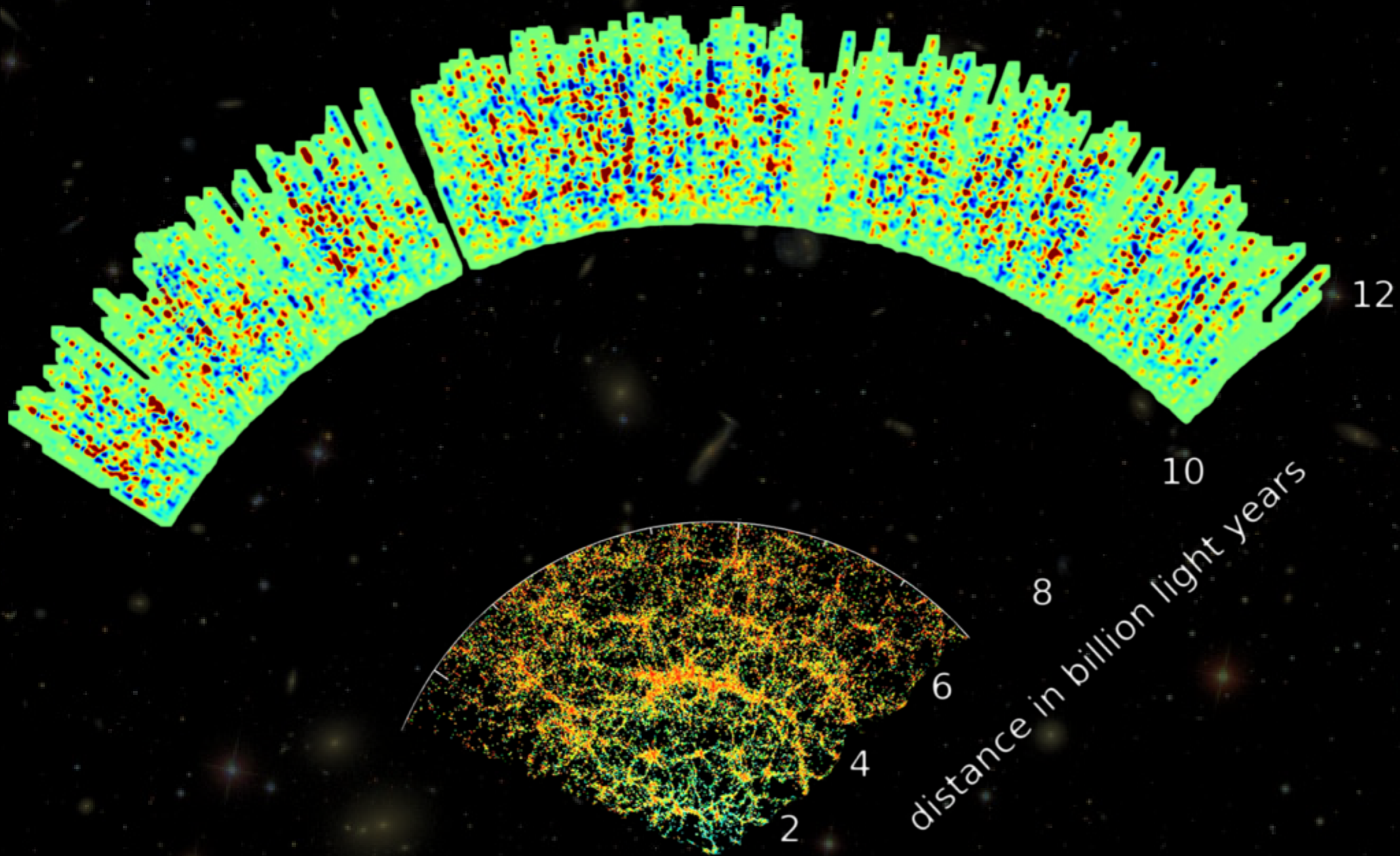
Principe de BOSS

Spectroscopic Survey



Tiling





Résultats DR11 (2013)

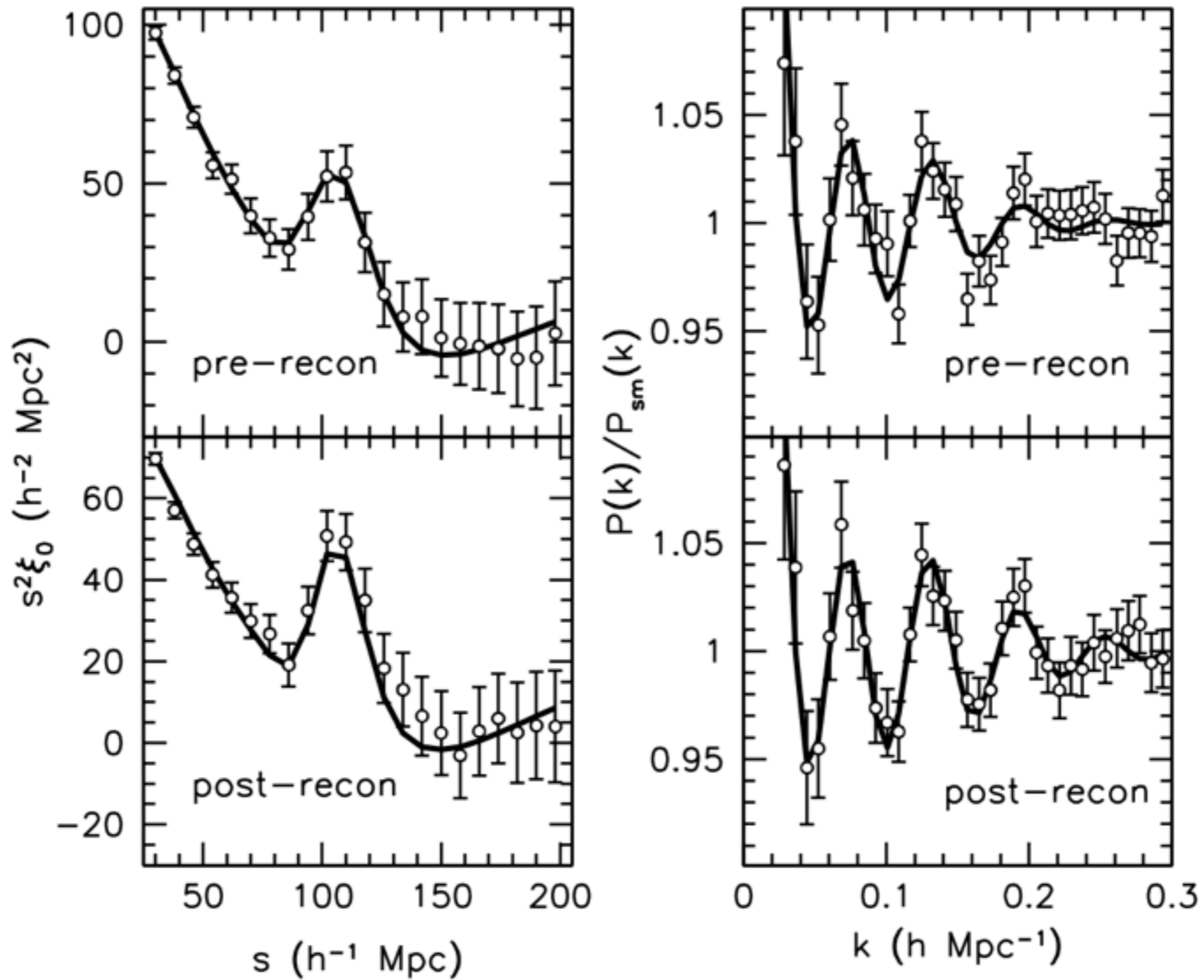
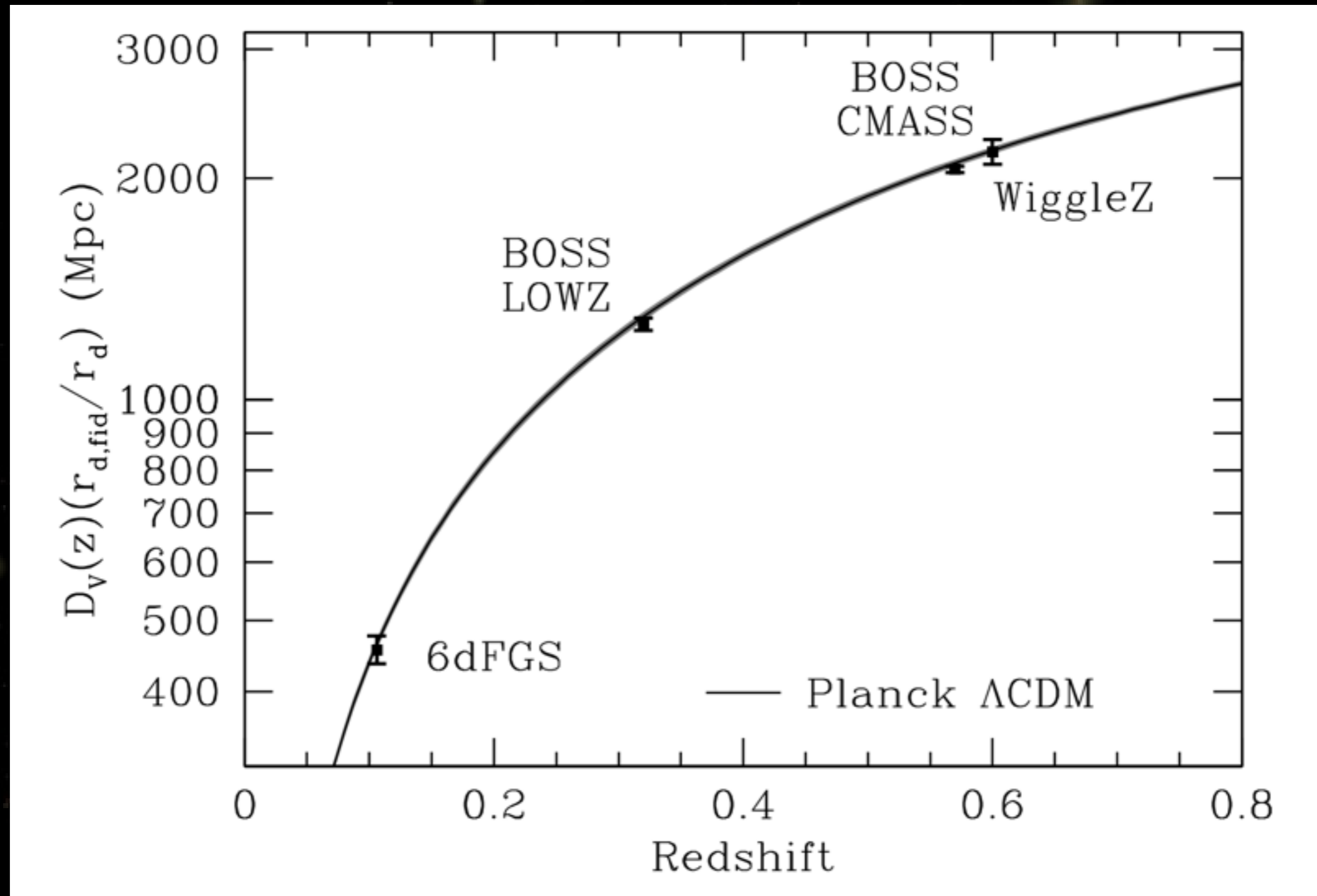
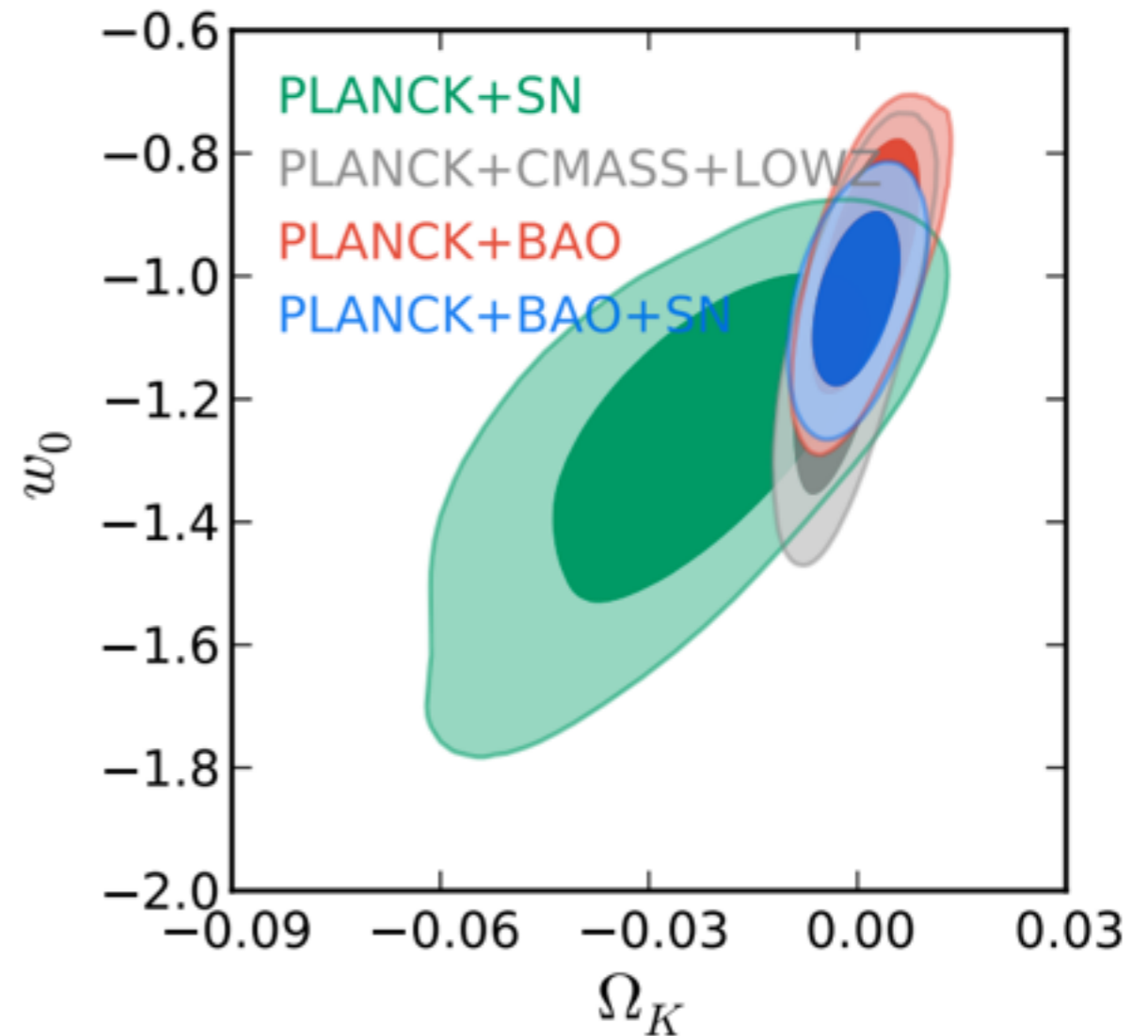
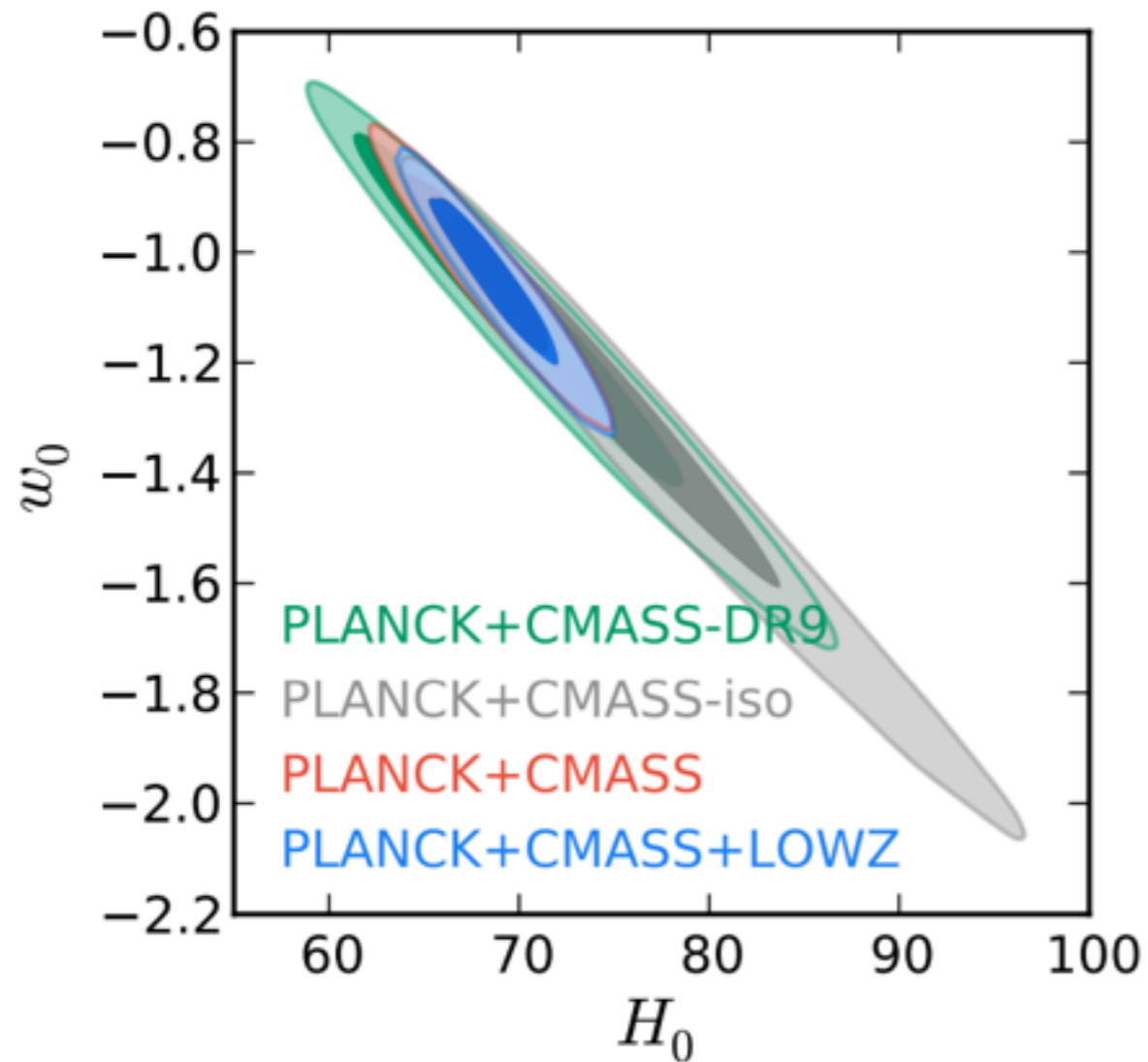


Diagramme de Hubble DR II



Contraintes cosmologiques DR I I



Contraintes cosmologiques DR I I

