

Cisaillement gravitationnel et sondage de l'univers

Y. Mellier

Institut d'Astrophysique de Paris & Observatoire de Paris/LERMA

Terapix and CSLS teams: A. Baillard (IAP), K. Benabed (IAP), F. Bernardeau (CEA/SPHT), E. Bertin (IAP), J. Coupon (IAP), M. Dantel-Fort (LERMA), L. Domisse (IAP), L. Fu (IAP), S. Gwyn (U. Victoria), H. Hoekstra (U. Victoria), M. Hudson (U. Waterloo), M. Kilbinger, F. Magnard (IAP), J.-C. Malapert (IAP), M. Martig (IAP), C. Marmo (IAP), R. Maoli (IAP), H.J. McCracken, Y. Mellier (IAP), L. Parker (U. Waterloo/ESO), U.L. Pen (CITA), A. Rojbi (IAP), M. Schultheis (Obs. Besançon), E. Semboloni (IAP/Bonn), I. Tereno (Bonn/IAP), L. van Waerbeke (UBC, Vancouver), J.-P Uzan (IAP), C. Schimd (CEA/SPP and IAP)

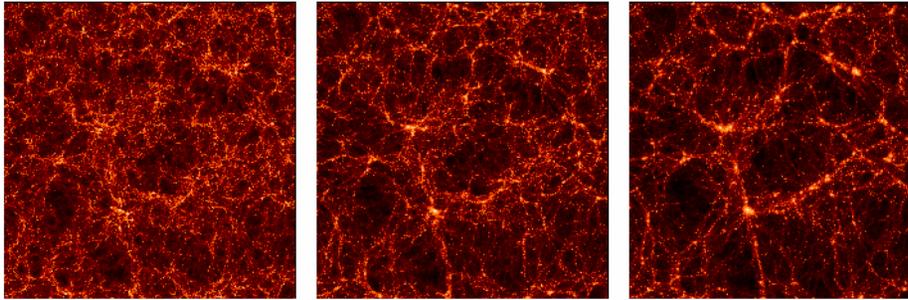
L'Univers en une page...

- Semble **homogène et isotrope** à très grande échelle. Principe cosmologique.
- Est en expansion et **l'expansion s'accélère**
- Est « **plat** » (sa courbure est nulle)
- **Composition:**
70% d'énergie sombre (nature inconnue), 25% de matière noire (nature inconnue) et 4% de matière ordinaire (« baryonique »)
- **Structuration actuelle** : résultat de la croissance de perturbations par instabilité gravitationnelle
- **Taux de croissance** des structures et leur distribution relative en fonction des échelles : dépendent du contenu de l'univers en matière (noire) et en énergie (sombre)
- Cette « histoire cosmique » est imprimée dans la **distribution de la matière en fonction des échelles**: le spectre de puissance de la matière (noire)
- On peut « voir » **l'évolution du spectre de puissance** de cette matière : observation de l'univers lointain.
- Les cosmologistes caractérisent l'univers par une série de « **paramètres cosmologiques** »:
 - H_0 = expansion (constante de Hubble)
 - Ω_m = fraction de matière
 - Ω_x = fraction d'énergie sombre (qui pourrait être la constante cosmologique Λ)
 - w = propriété de l'énergie sombre *Pressure* = $w \times$ *Densité* (i.e. l'équation d'état de l'énergie sombre)
 - σ_8 = l'amplitude du spectre de puissance: initial $P(k) = \sigma_8 k^n$ (mais $P(k)$ au cours du temps; n est son « indice spectral »)

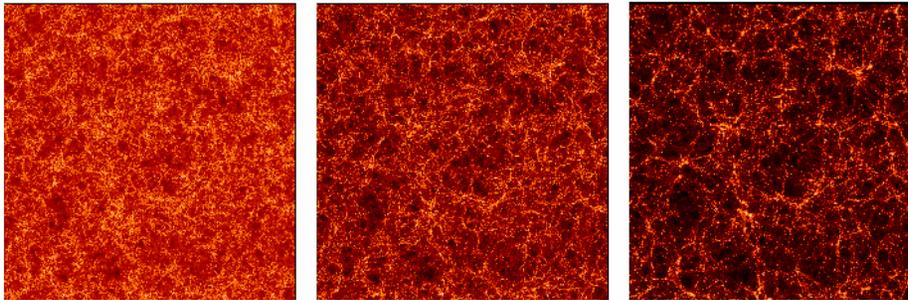
Vers le passé (décalage spectral)

← $z=3$ $z=1$ $z=0$ (today)

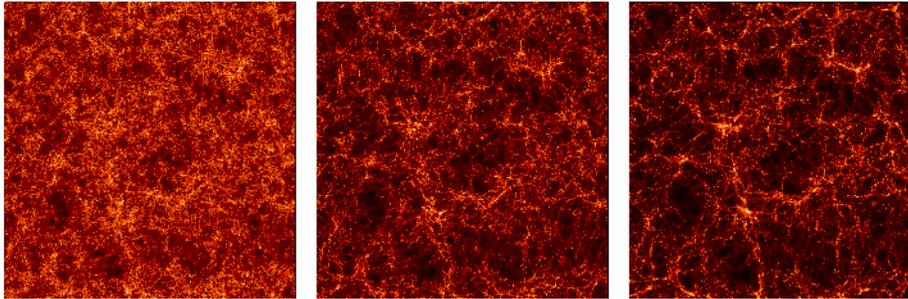
$H_0 = 70$
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_x = 0.7$
 $W = -1 (\Lambda)$, Λ CDM
 $\sigma_8 = 0.9$



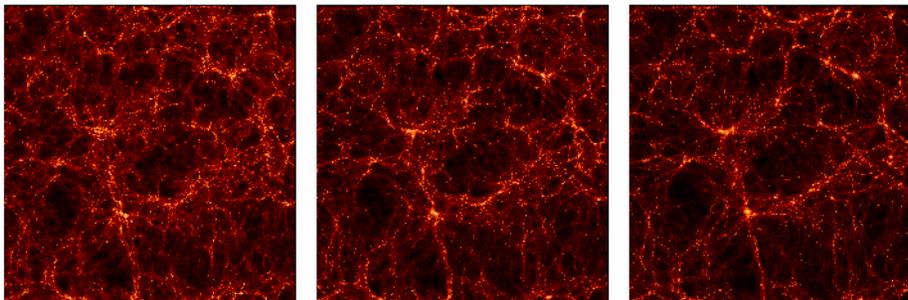
$H_0 = 50$
 $\Omega_m = 1.0, \Omega_x = 0.0$
 $W = 0$, SCDM
 $\sigma_8 = 0.51$



$H_0 = 70$
 $\Omega_m = 1.0, \Omega_x = 0.0$
 $W = 0$, τ CDM
 $\sigma_8 = 0.51$



$H_0 = 70$
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_x = 0.7$
 $W = 0$, OCDM
 $\sigma_8 = 0.85$

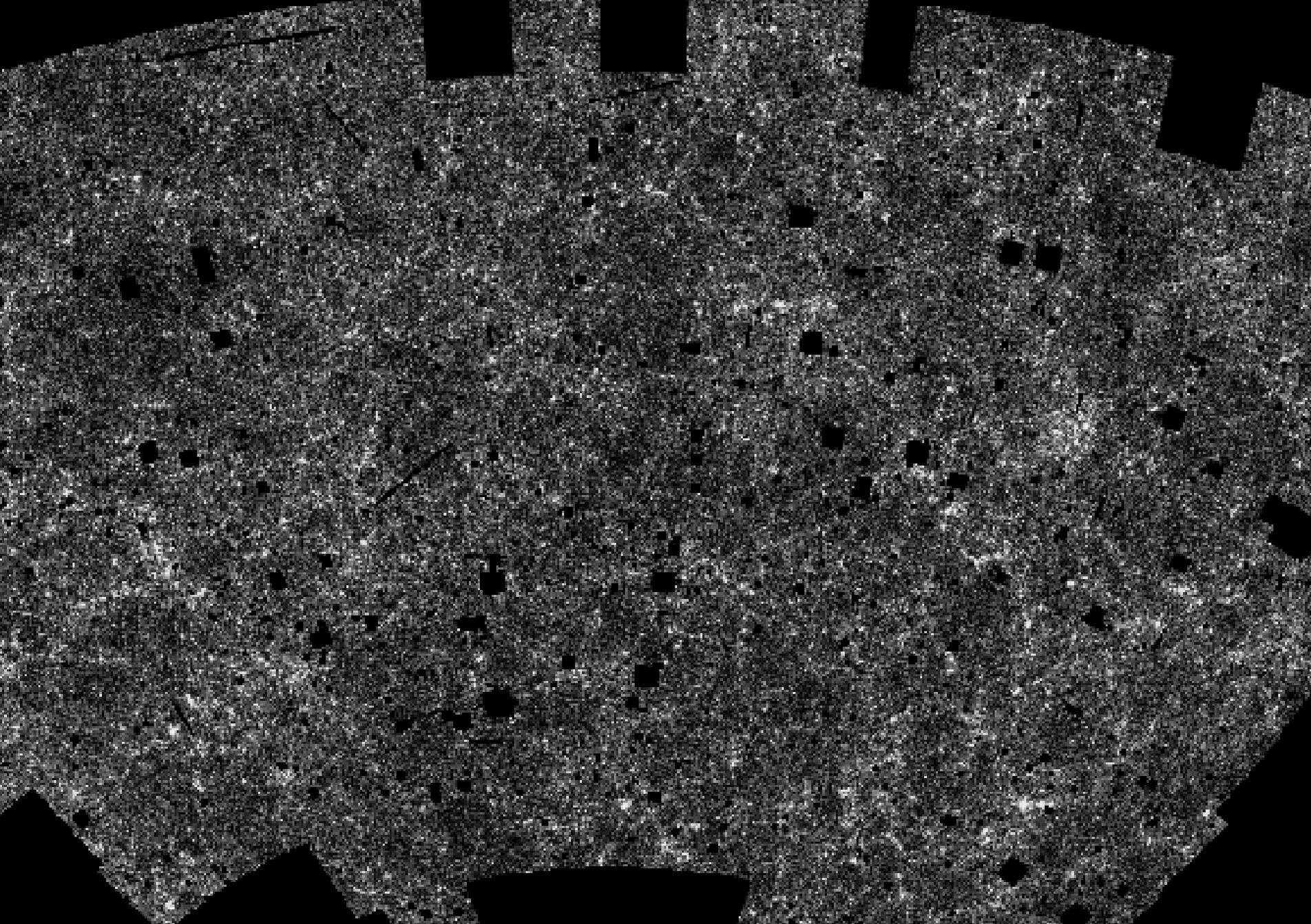


Formation des structures en fonction du contenu en matière et énergie noires



La matière et l'énergie noire révèlent l'histoire du spectre de puissance

Comment observer le spectre de puissance?



Le spectre de puissance des galaxies ... si lumière = matière

Comment observer le spectre de puissance ?



... mais la lumière ne reflète pas (complètement) la masse

Comment observer le spectre de puissance?

Nous avons besoin d'un outil qui
« voit » la matière noire

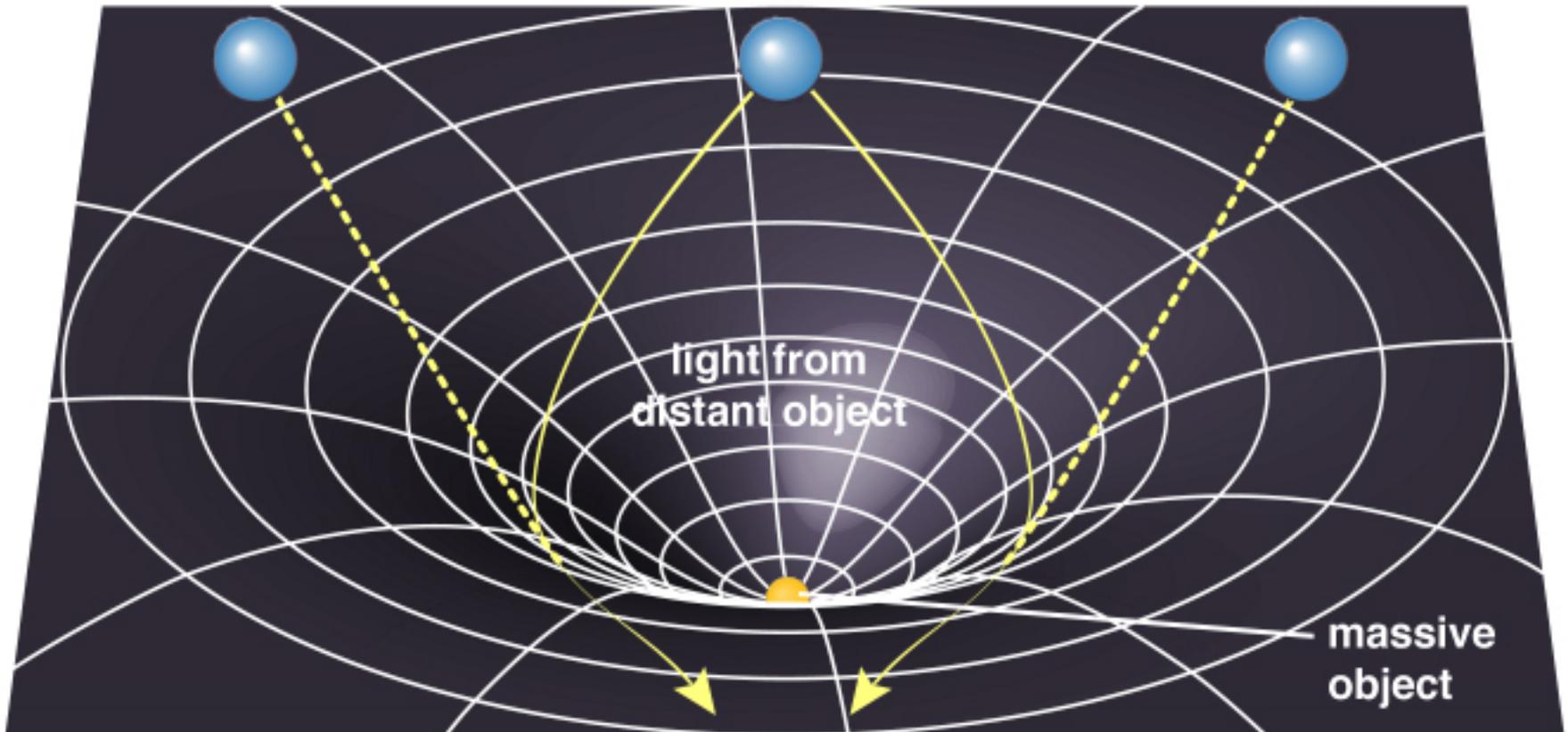
La Relativité Générale:

la courbure de l'espace-temps est modifiée par les concentrations de masse

Position apparente: première image

Position réelle de l'image

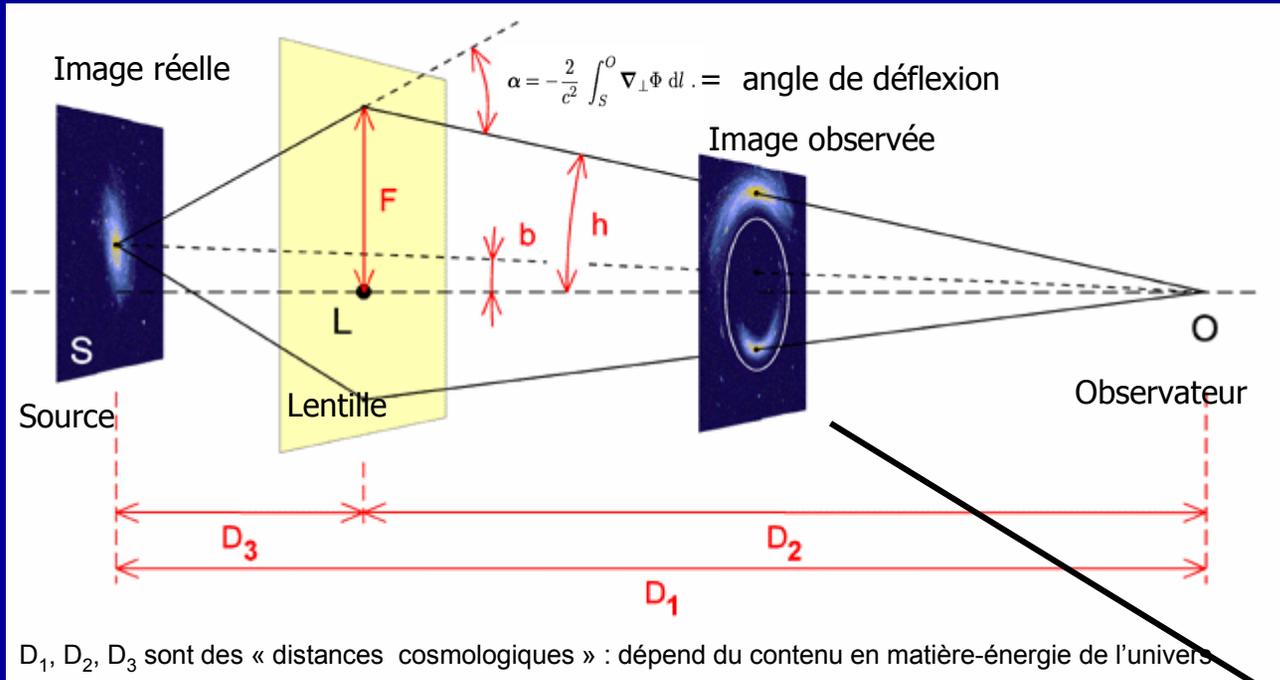
Position apparente: seconde image



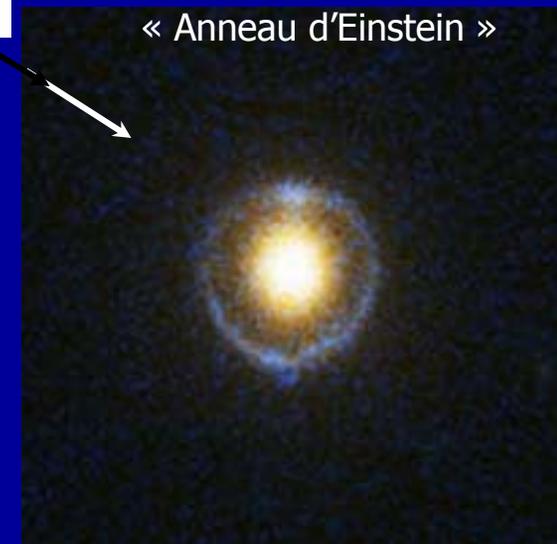
Déflection de la lumière, amplification, multiplication des images, distorsion des objets: **tous ces phénomènes dépendent de la quantité de matière**

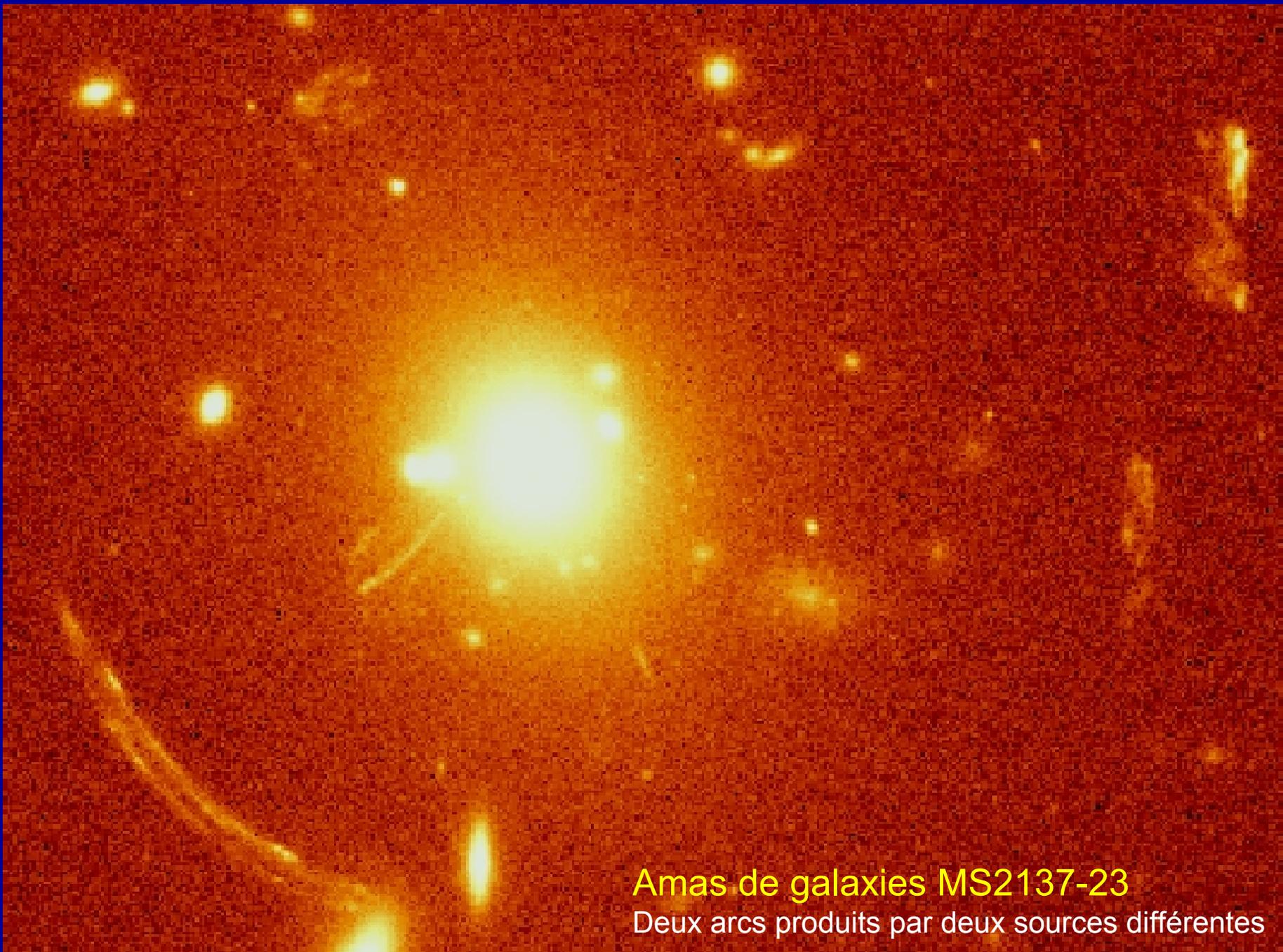
De plus: l'effet de lentille gravitationnelle **est achromatique**: les photons suivent des géodésiques indépendamment de leur énergie.

Configuration parfaite



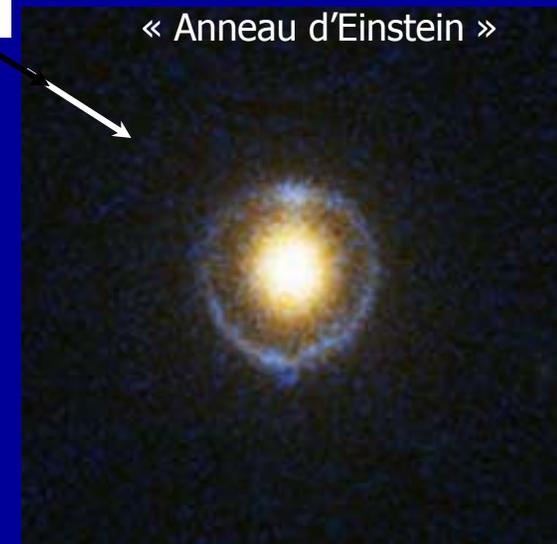
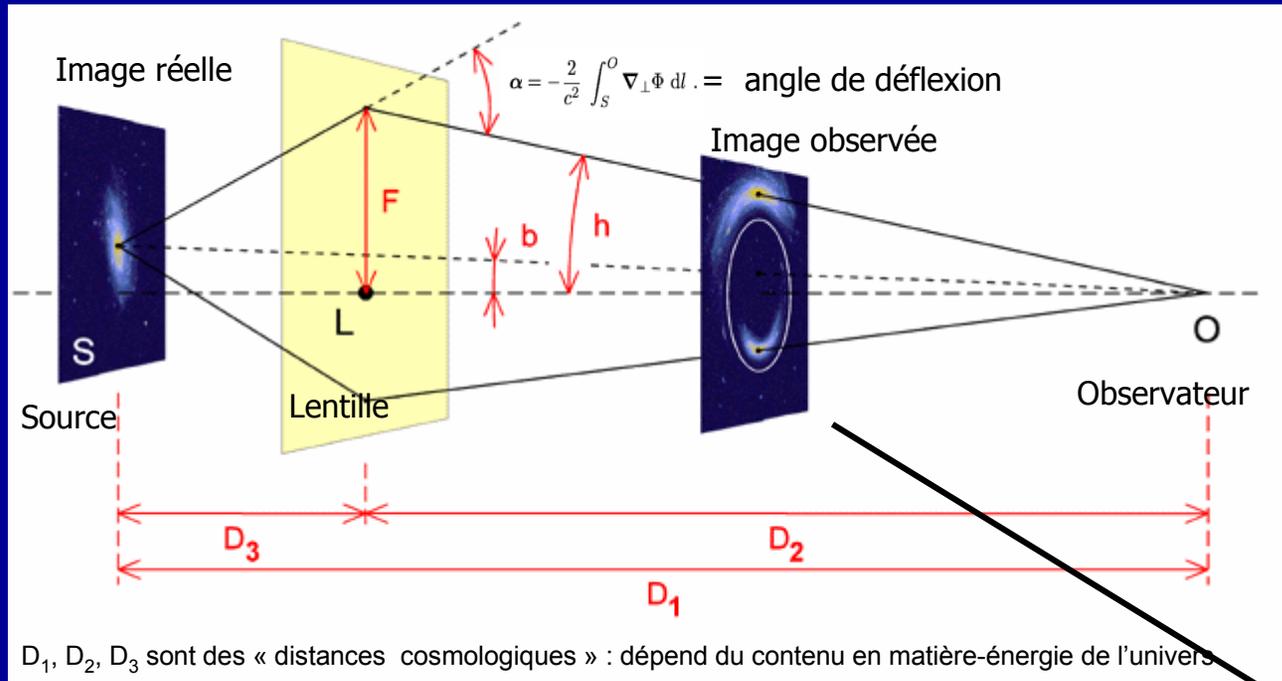
Source-Lentille-Observateur alignés





Amas de galaxies MS2137-23
Deux arcs produits par deux sources différentes

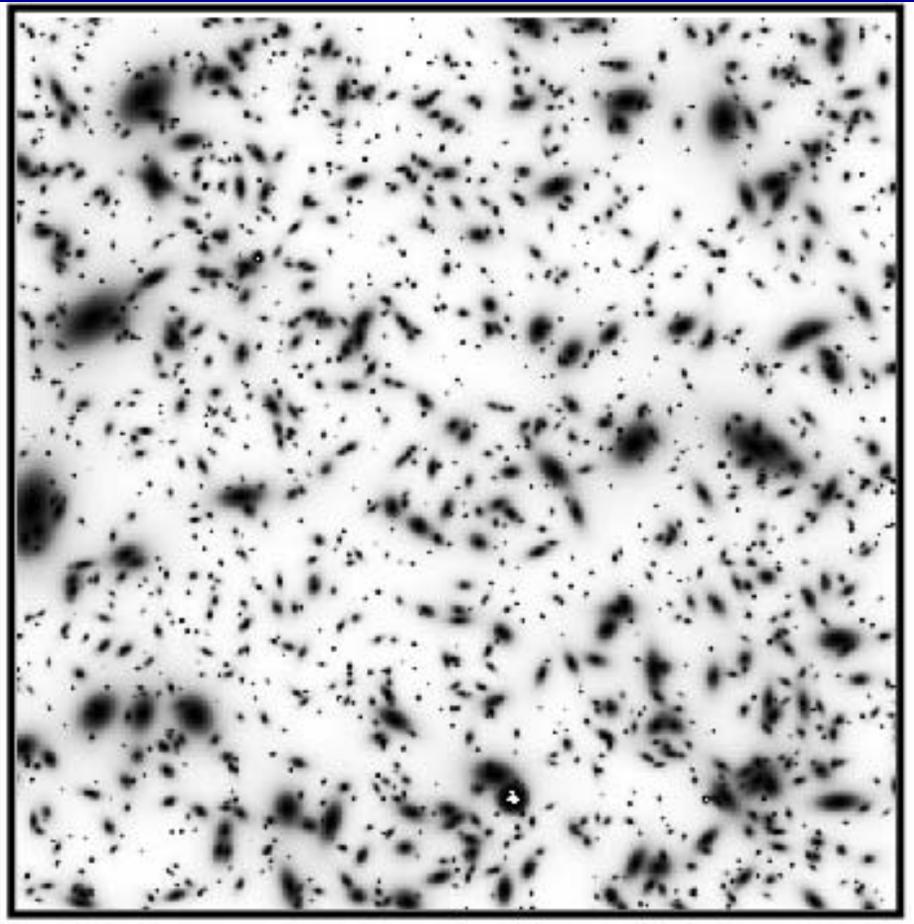
Configuration parfaite



Source-Lentille-Observateur alignés

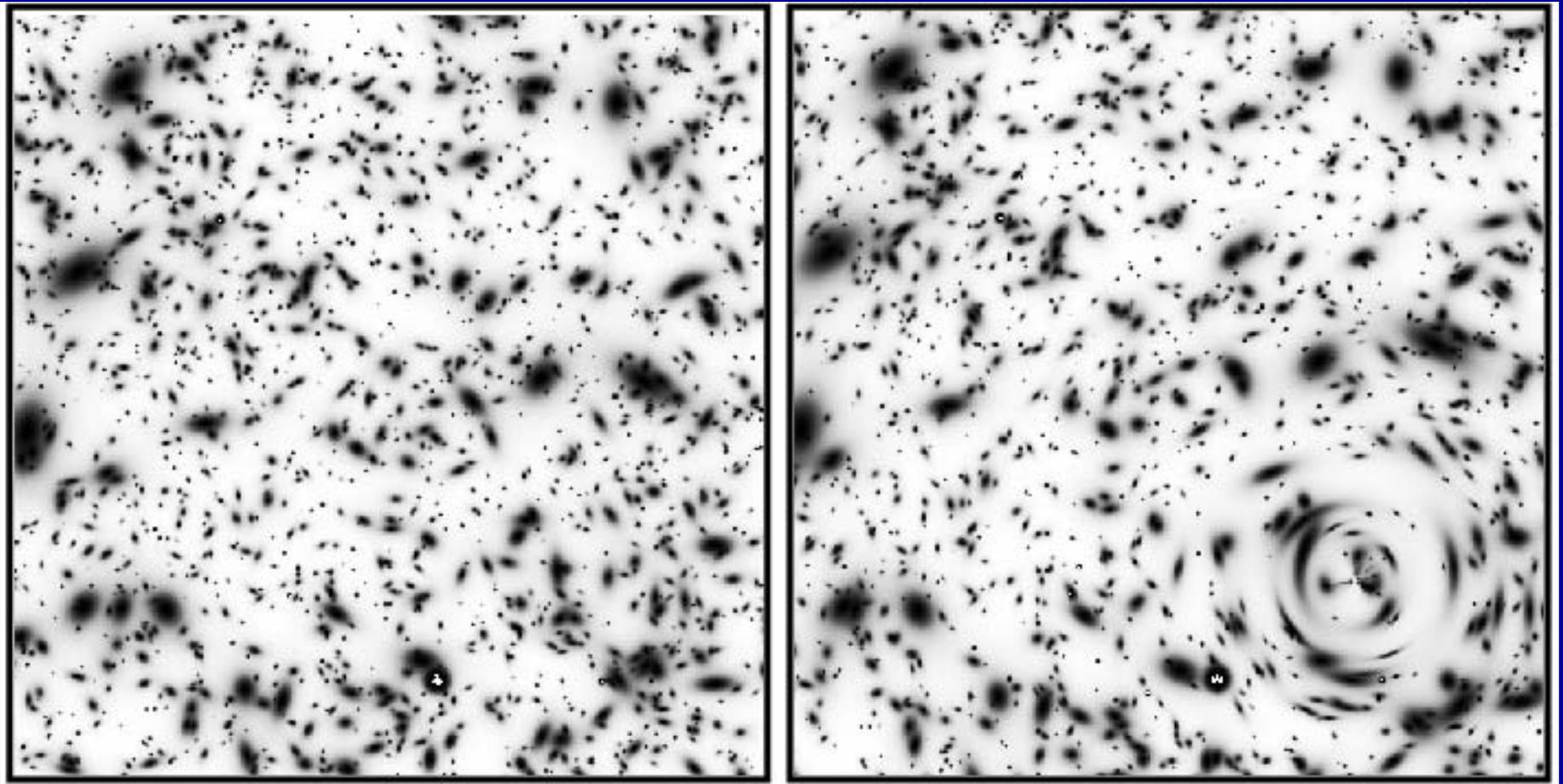
Mais ce sont des configurations exceptionnelles

Heureusement... il y a des
milliards de galaxies

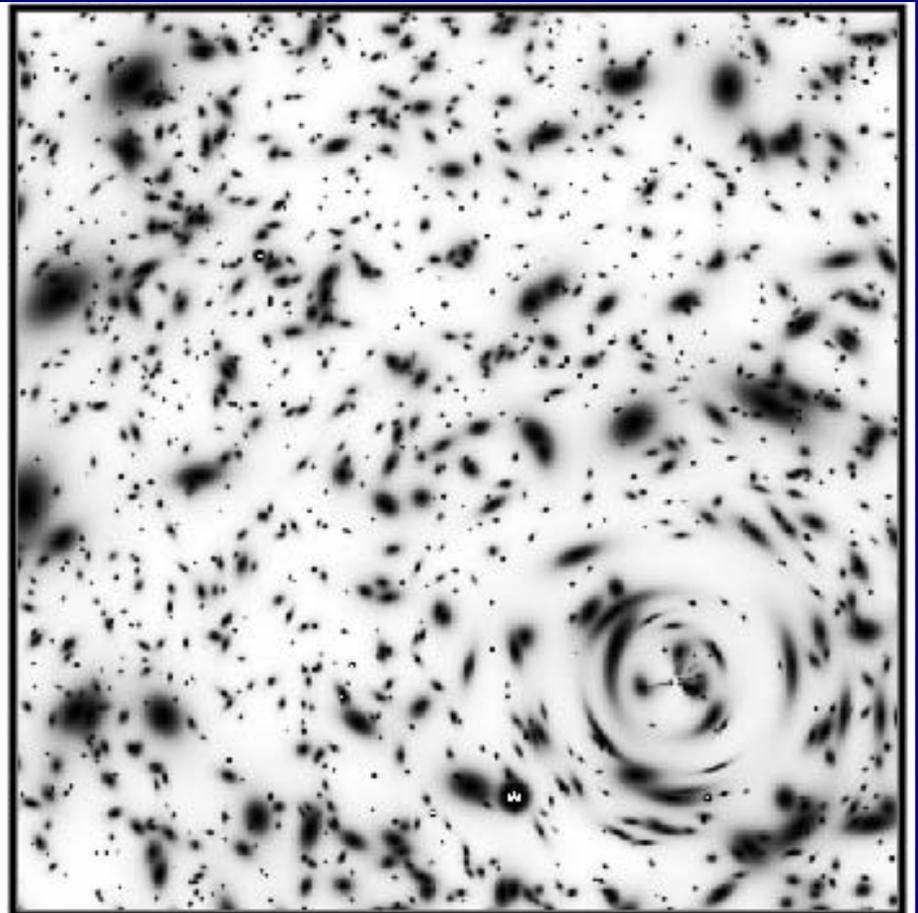
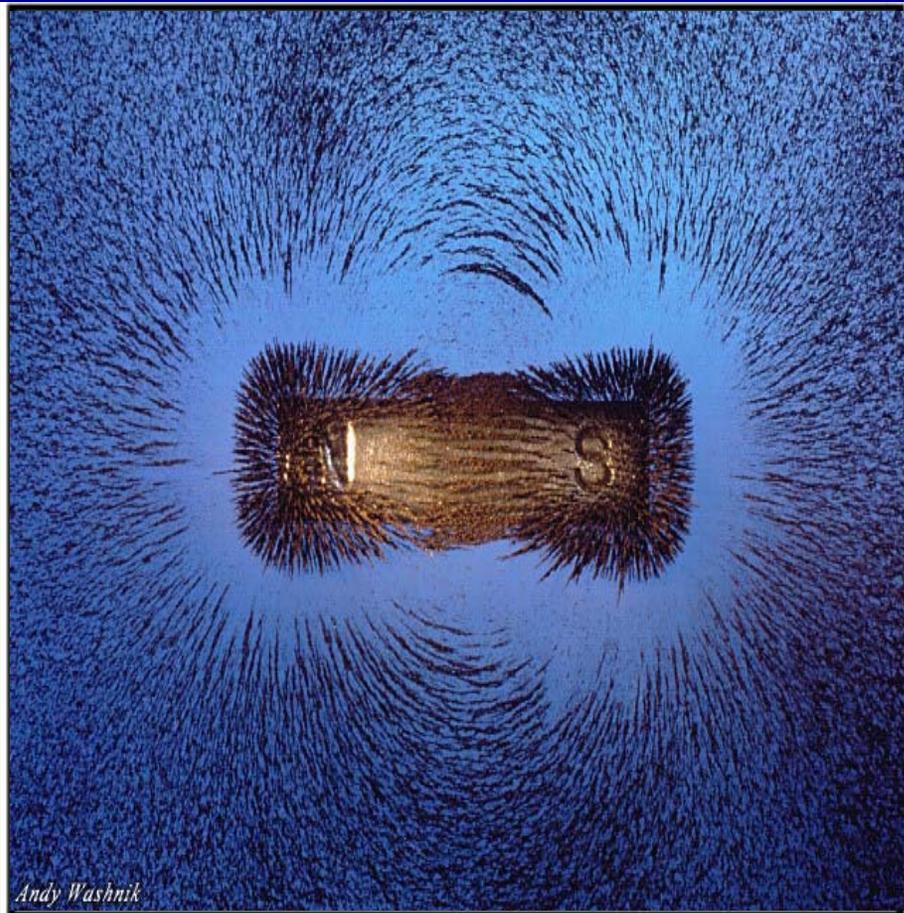


Une image profonde simulée:
> $2 \cdot 10^5$ galaxies/deg²

Heureusement... il y a des milliards de galaxies



Le champ cohérent de « polarisation » des galaxies trace le champ de gravité comme la limaille de fer trace le champ magnétique





L'amas de galaxies Abell 1698, décalage spectral $z \sim 0.2$; HST/ACS

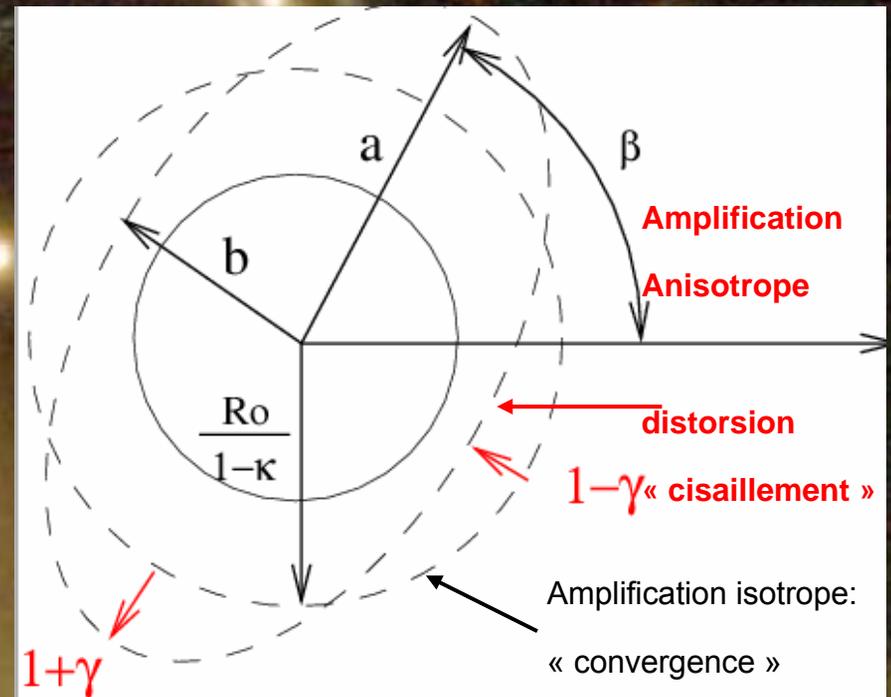


Filamentos de galaxias Abell 1698, $z \sim 0.2$; HST/ACS

Manifestation de l'effet de distorsion gravitationnelle:
Les galaxies accroissent leur ellipticité apparente



Manifestation de l'effet de distorsion gravitationnelle: Les galaxies accroissent leur ellipticité apparente

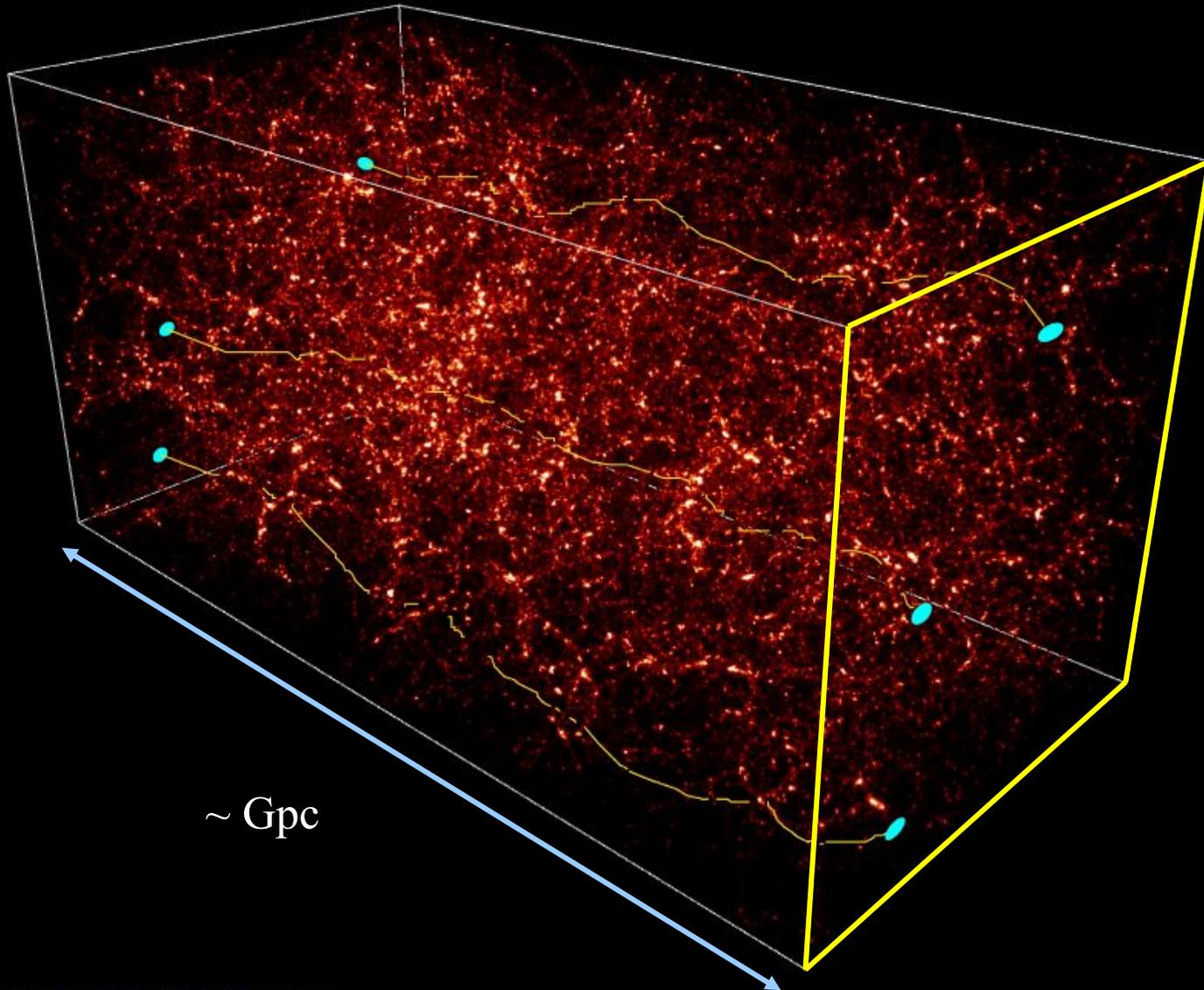


Les arcs/anneaux gravitationnels sont
des cas rares...

heureusement... il y a des milliards de
galaxies... et des milliards de lentilles
gravitationnelles!

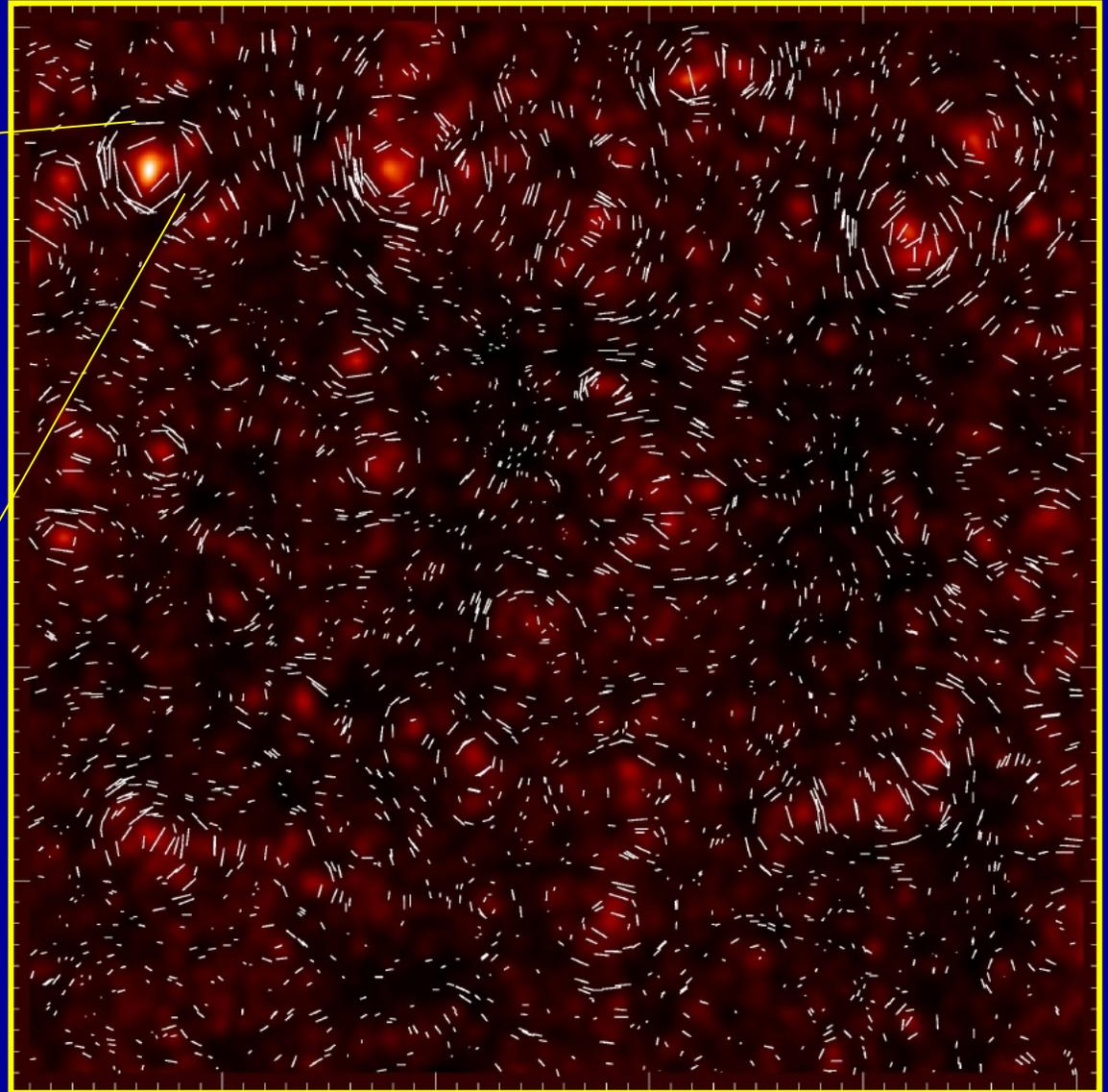
... si on explore l'univers entier, lentilles et
sources se mélangent, leur effets
s'accumulent le long des lignes de visée...
d'où il résulte des effets de lentille
gravitationnelle « cosmologique »

Cosmic shear : propagation de la lumière dans la toile cosmique



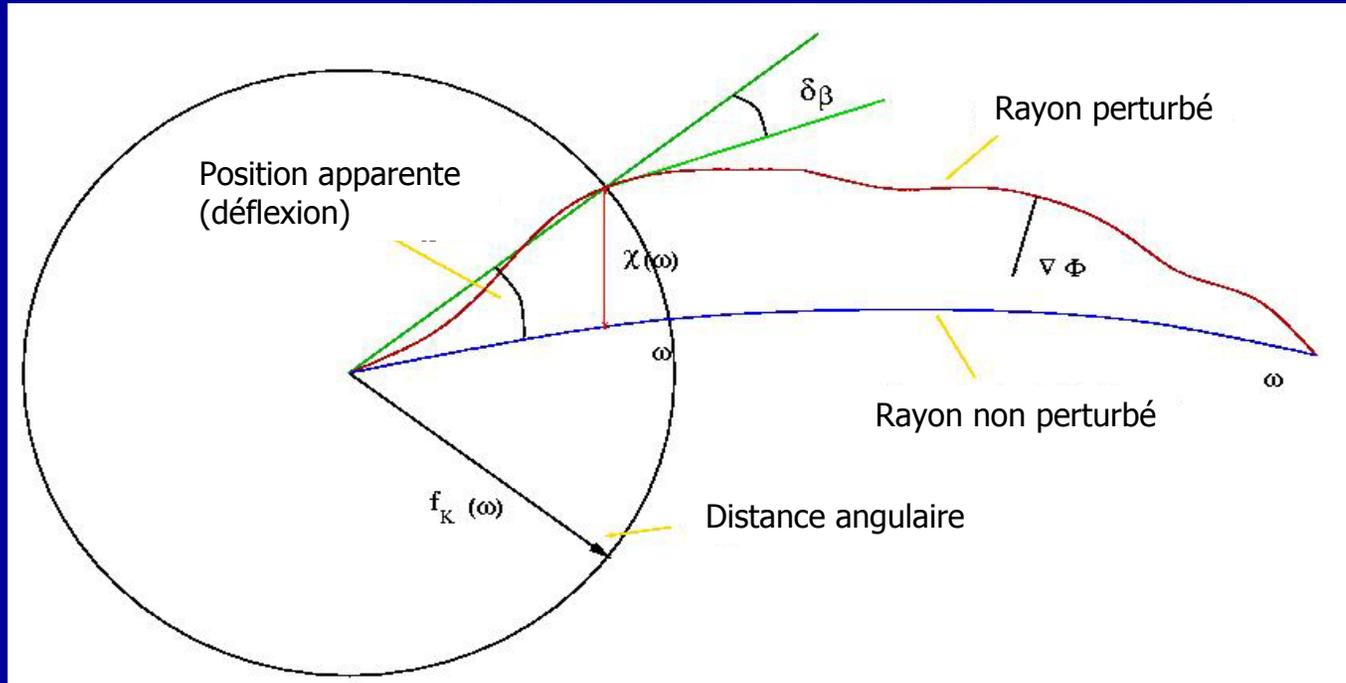
~ Gpc

Distorsion cosmologique projetée sur le ciel



- Est-elle mesurable?
- Peut-on l'interpréter pour contraindre les scénarios cosmologiques ?

Distorsion gravitationnelle et cosmologie: propagation de la lumière dans un univers hétérogène



Distances

Contraste de densité de matière à la distance de la perturbation

$$\gamma = \frac{3H_0^2\Omega_0}{2c^2} \int_0^\omega \frac{f_K(\omega - \omega') f_K(\omega')}{f_K(\omega)} \frac{\delta[f_K(\omega') \theta; \omega']}{a(\omega')} d\omega'$$

Propriétés du cisaillement cosmique

Cas simple: un seul plan lentille et un spectre de puissance de la matière noire simple $P(k) \sim \sigma_8 k^n$

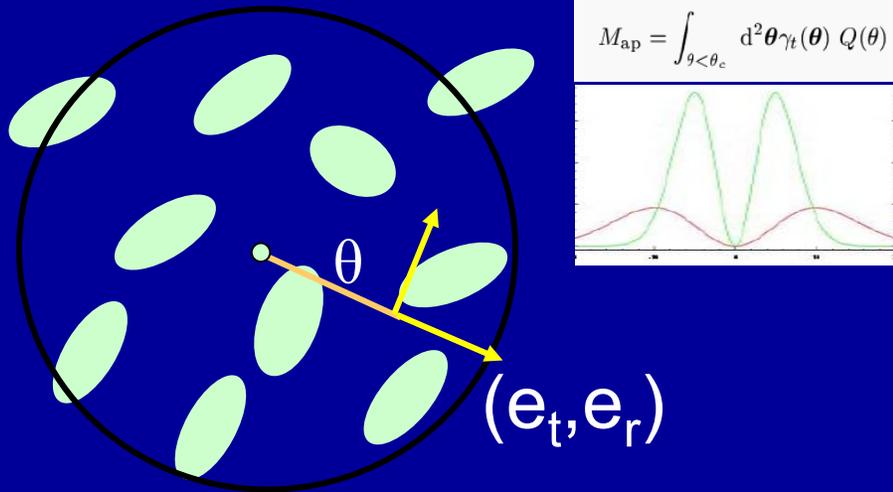
Propriétés de la matière noire

$$\langle \gamma^2(\theta) \rangle^{1/2} \approx 0.01 \sigma_8 \Omega_m^{0.8} \left(\frac{\theta}{1 \text{deg.}} \right)^{-\frac{n+2}{2}} z_s^{0.75}$$

- L'amplitude de l'accroissement d'ellipticité produit par le cisaillement gravitationnel cosmologique et donc de $\sim 1\%$
- Mais la dispersion intrinsèque de la distribution en ellipticité des galaxies est $\sim 30\%$

Analyse statistique du cisaillement cosmologique des galaxies

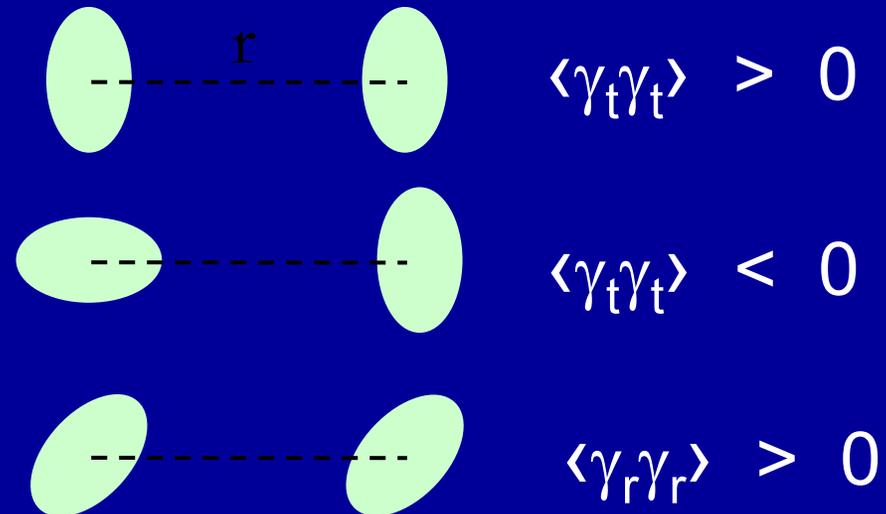
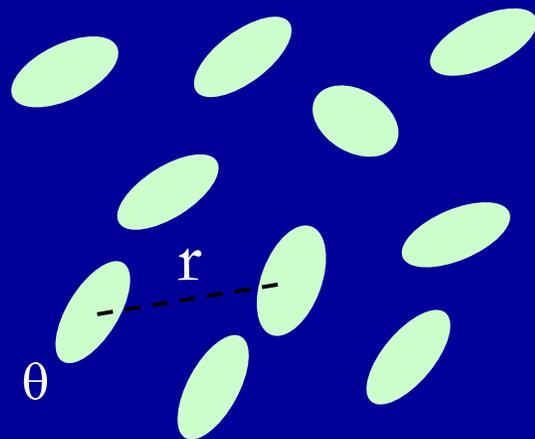
Map variance



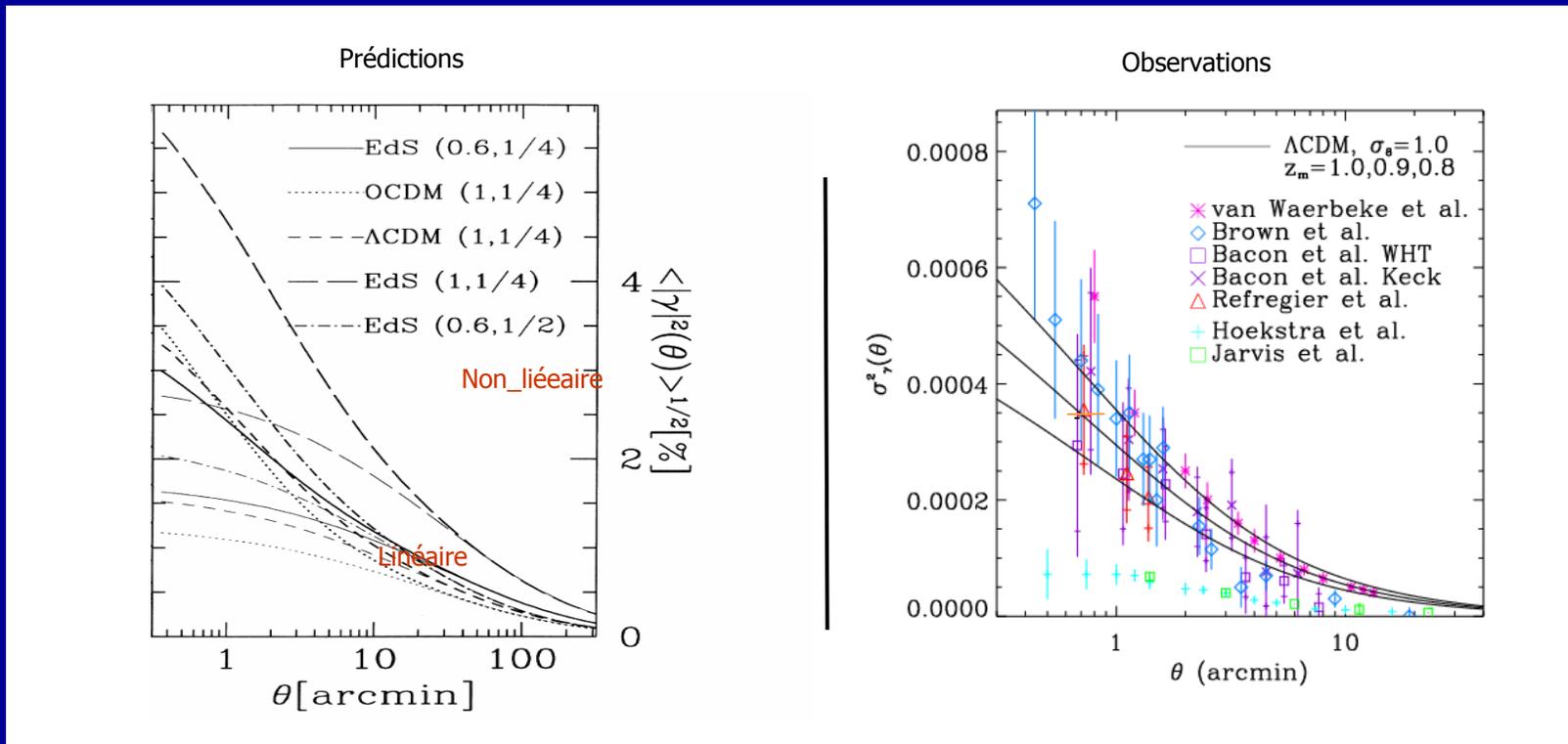
Variance de la distribution

$\langle e^2 \rangle \sim \gamma^2$

Fonction de corrélation



Propriétés des statistiques en fonction de l'échelle = spectre de puissance de la matière projeté sur le ciel



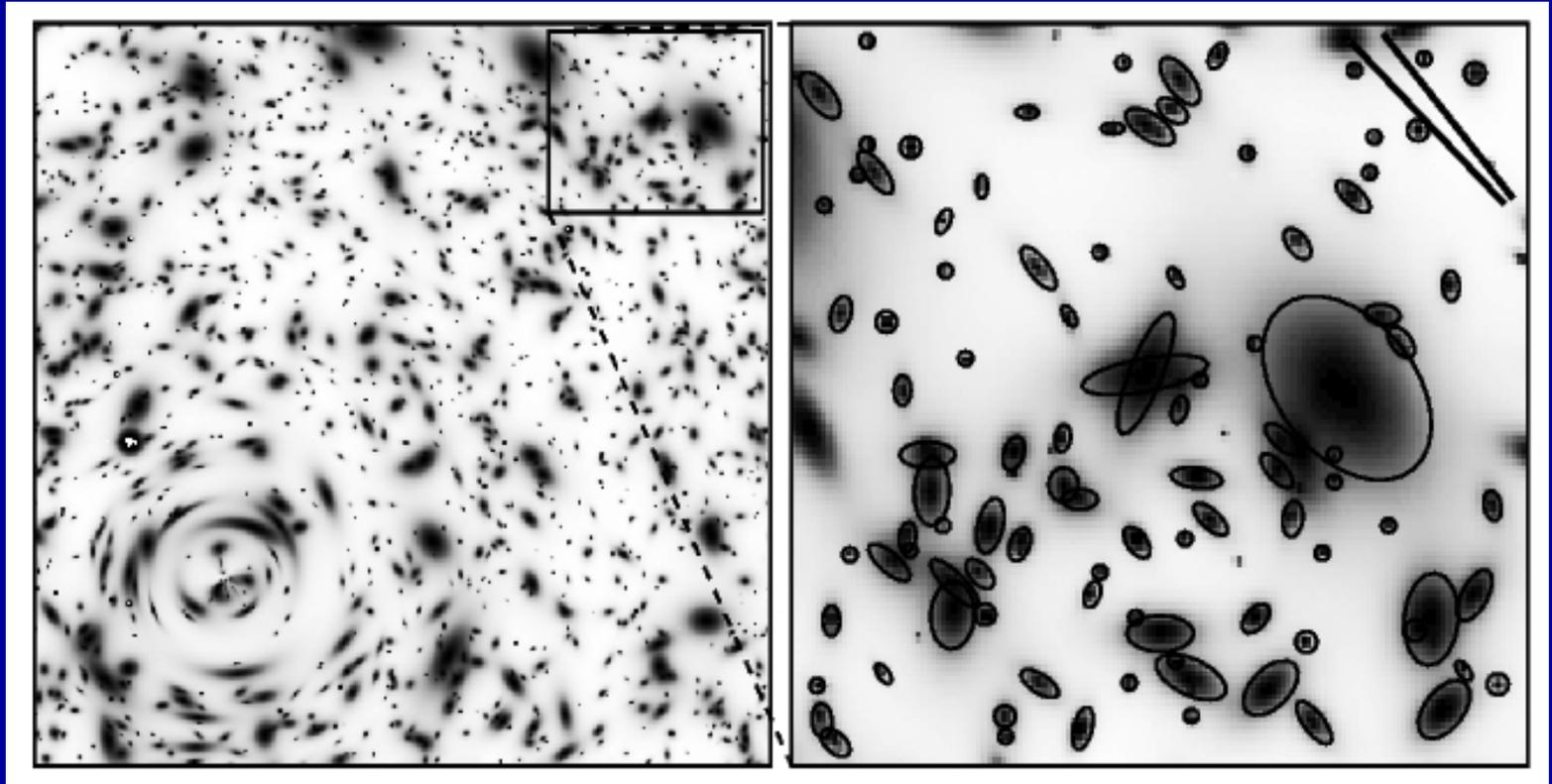
Mesurer le cisaillement cosmique

- Signal de très faible amplitude
- Signal très bruité et contaminé: difficile de l'extraire des données brutes

Points crucial:

contrôle des effets systématiques et démonstration de la fiabilité des mesures

Distorsion gravitationnelle et forme des galaxies

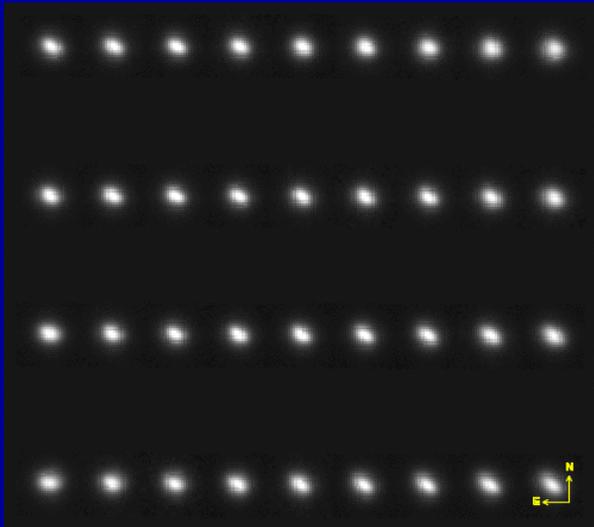


Si la distribution en orientation des galaxies dans l'univers est isotrope alors, en moyenne,
 $\langle \text{ellipticité} \rangle = \text{cisaillement}$

...Mais les ellipticité mesurées sont fortement contaminées...

La réalité: forme des étoiles observées avec l'instrument MegaPrime/Megacam

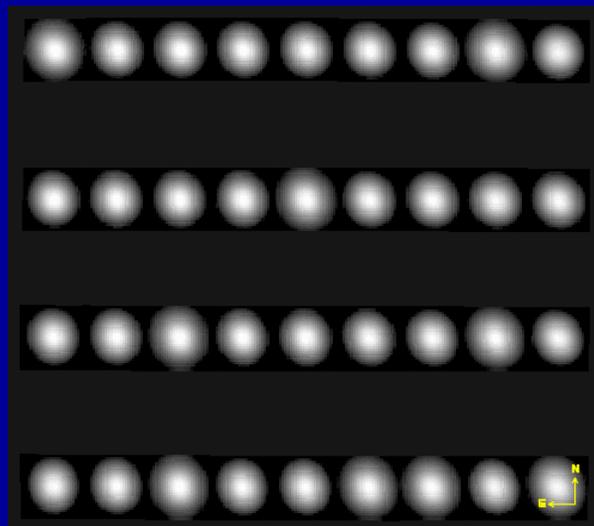
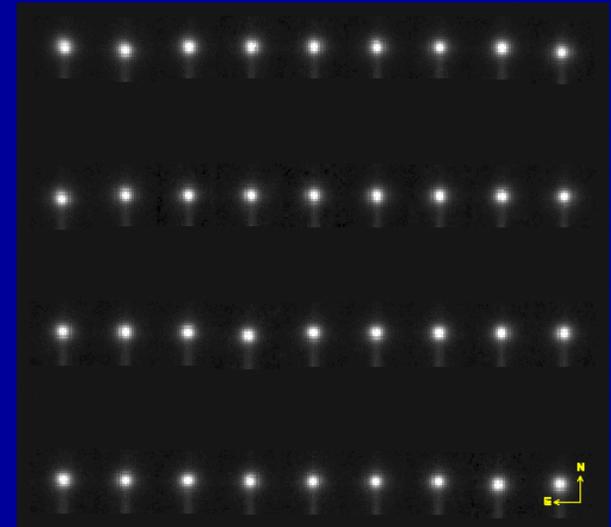
Télescope oscille



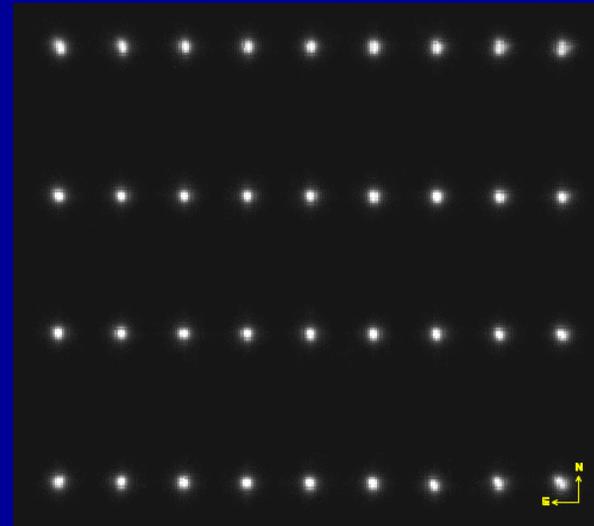
Télescope defocalisé



Télescope perd le guidage



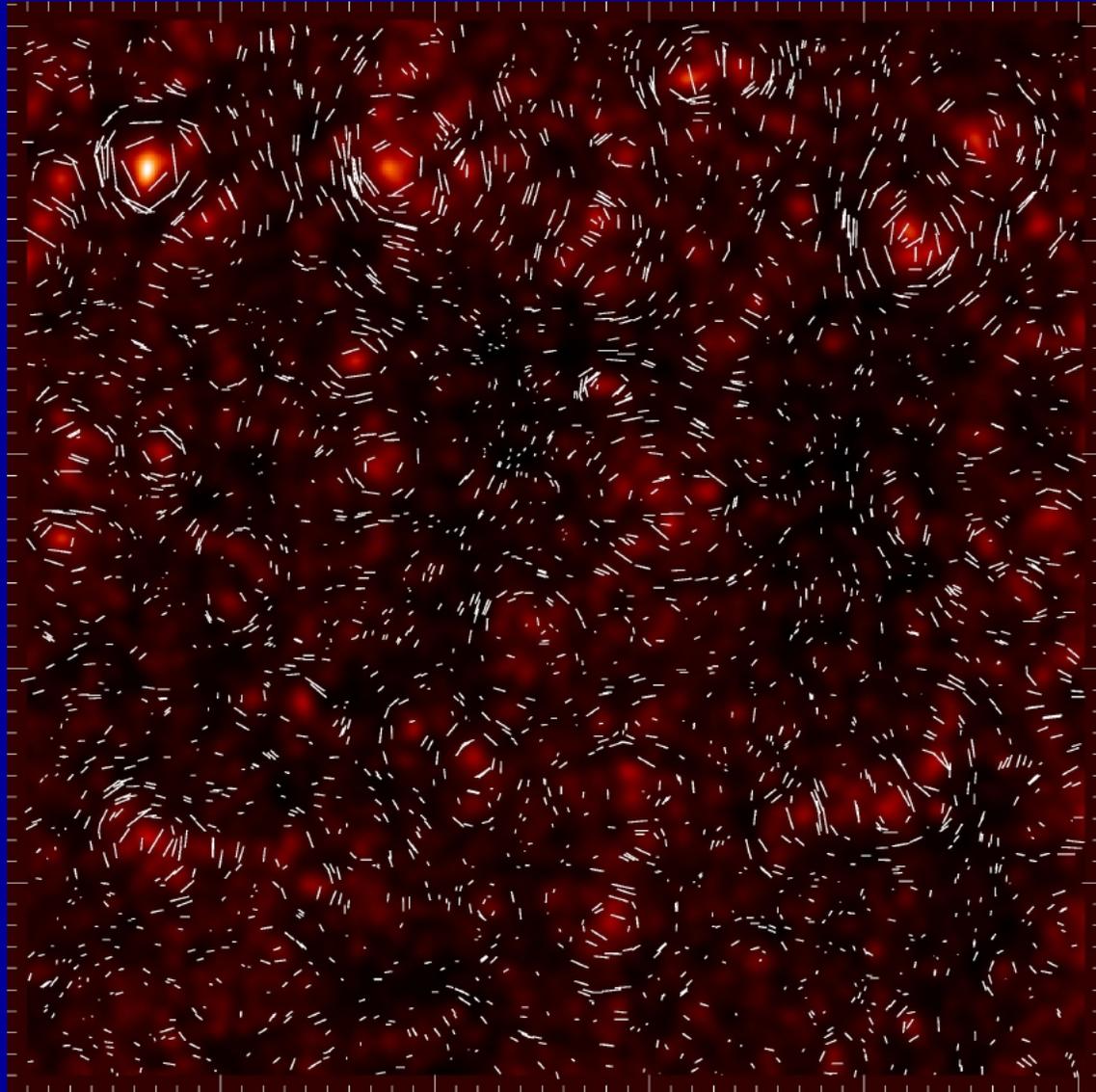
Seeing 2.5''



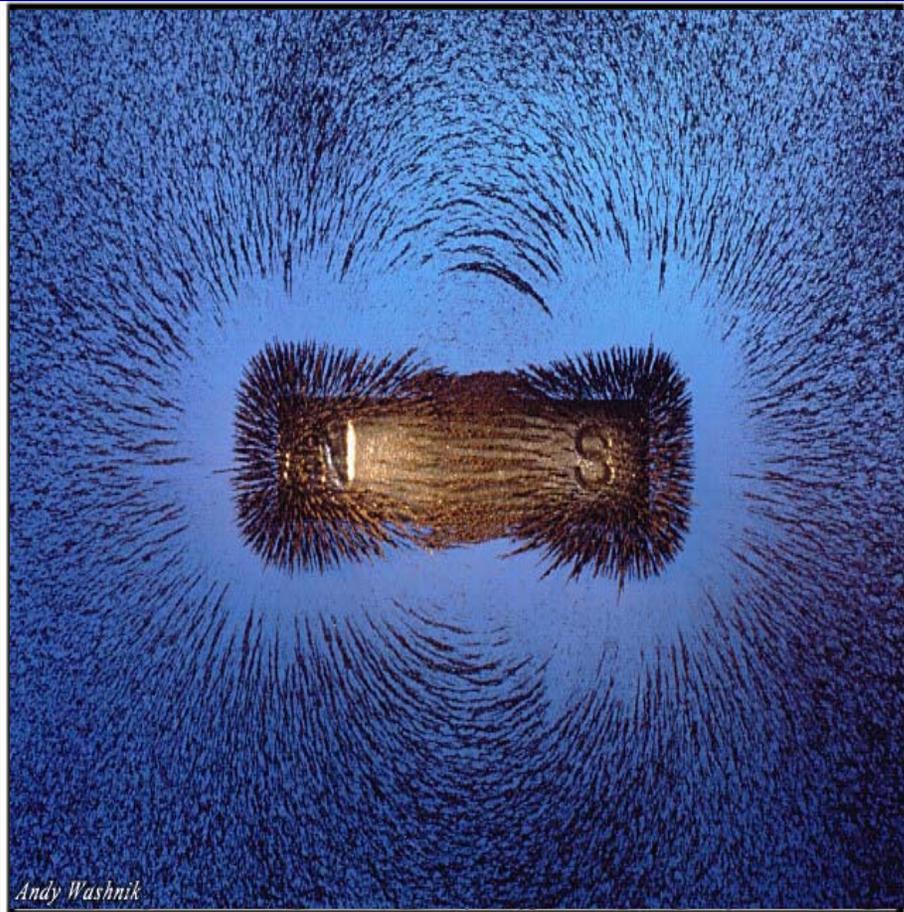
Seeing 0.55''

Un contrôle de la fiabilité et des systématiques:

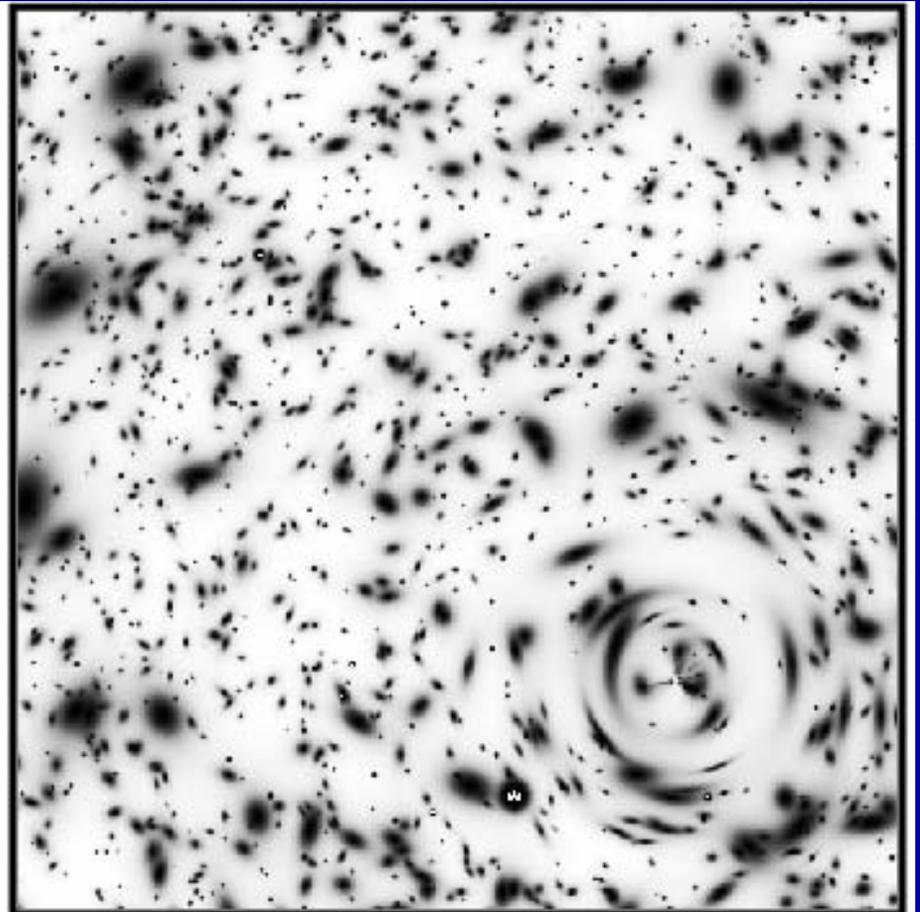
L'effet de lentille gravitationnelle de produit pas de « mode-B »



... Deux champs avec des propriétés différentes: modes « E » et « B »



Andy Washnik

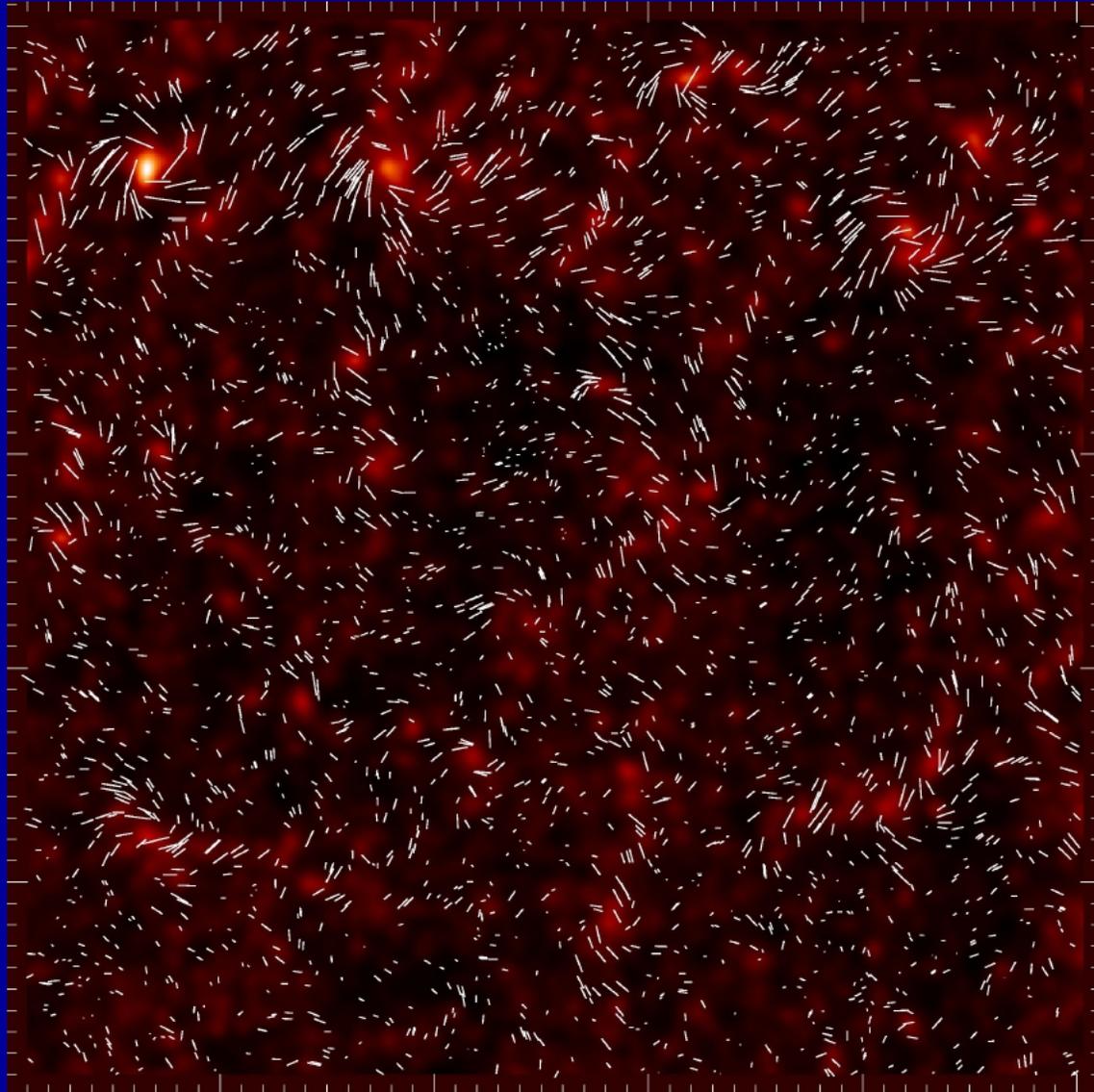


Magnétisme : Rotationnel $\neq 0$

Gravité : Rotationnel = 0

Un contrôle de la fiabilité et des systématiques:

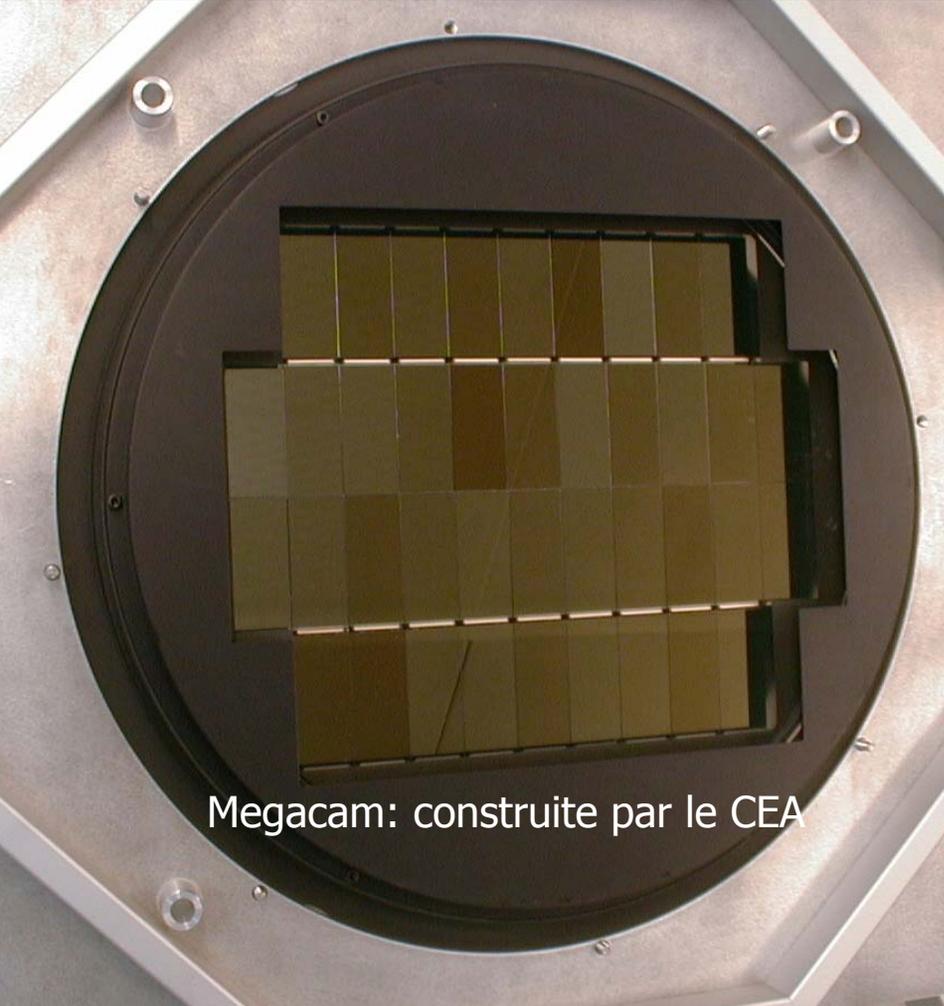
L'effet de lentille gravitationnelle de produit pas de « mode-B »



Le Canada France Hawaii Telescope Cosmic Shear Legacy Survey (CSLS)

K. Benabed (IAP), F. Bernardeau (CEA/SPhT), J. Coupon (IAP), L. Fu (IAP), S. Gwyn (U. Victoria), H. Hoekstra (U. Victoria), M. Hudson (U. Waterloo), M. Kilbinger, R. Maoli (IAP), Y. Mellier (IAP), L. Parker (U. Waterloo), U.L. Pen (CITA), C. Schimd (CEA/SPP, IAP), E. Semboloni (IAP), I. Tereno (IAP), J.-P., Uzan (IAP), L. van Waerbeke (UBC, Vancouver)

Le télescope CFHT: construit et géré par le CNRS/INSU, le CNRC et UH



Megacam: construite par le CEA



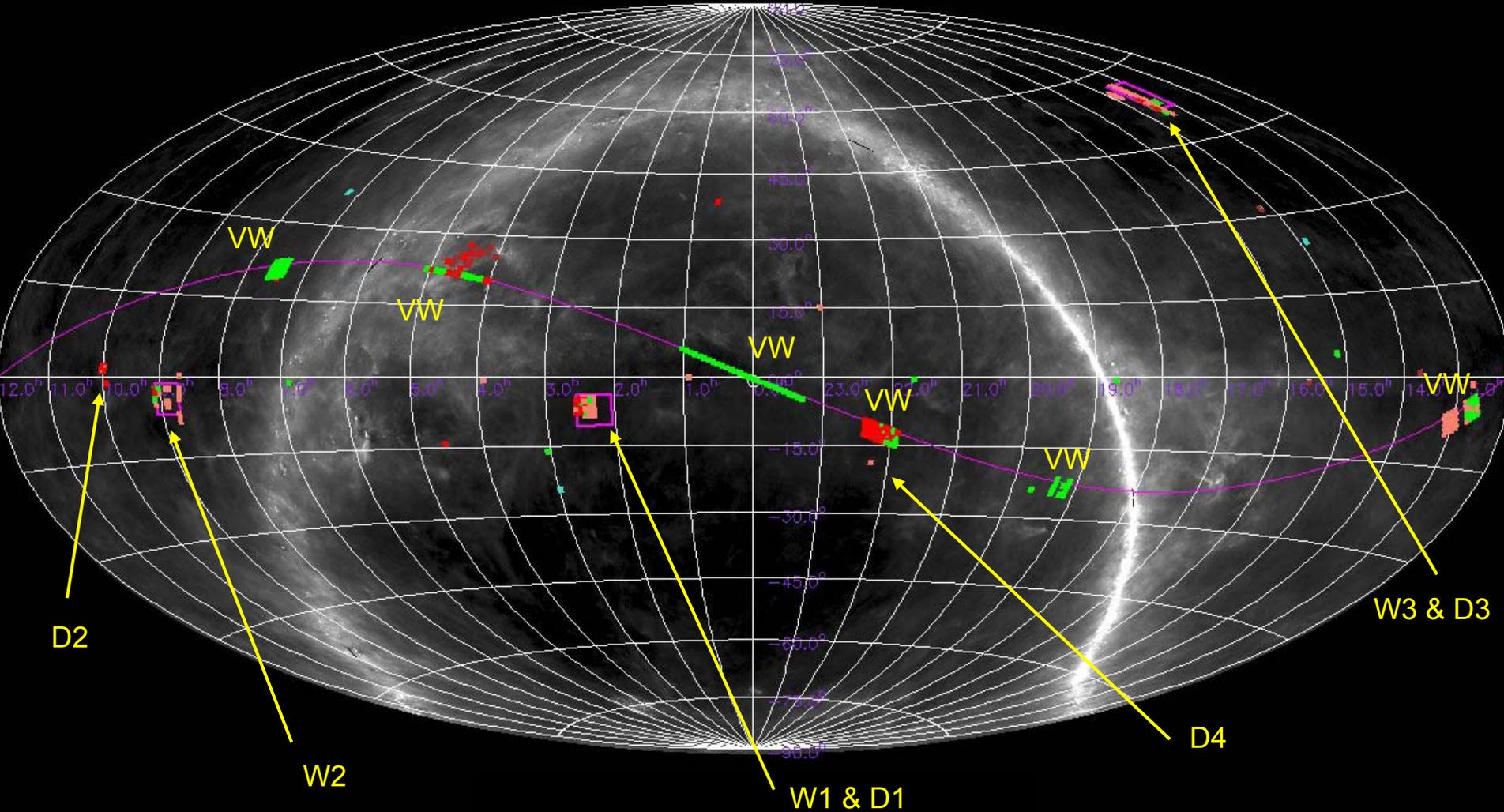
MegaPrime: CNRS/INSU, CNRC, UH

Data traitée par l'équipe du centre Terapix



Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey: Canada-France collaboration

- 3 champs W de 50 deg² (CFHTLS-Wide), 4 champs de 1 deg² (CFHTLS-Deep)
- 500 nuits entre Juin 2003 and Juin 2008 (temps de télescope CNRS/INSU+CNRC)

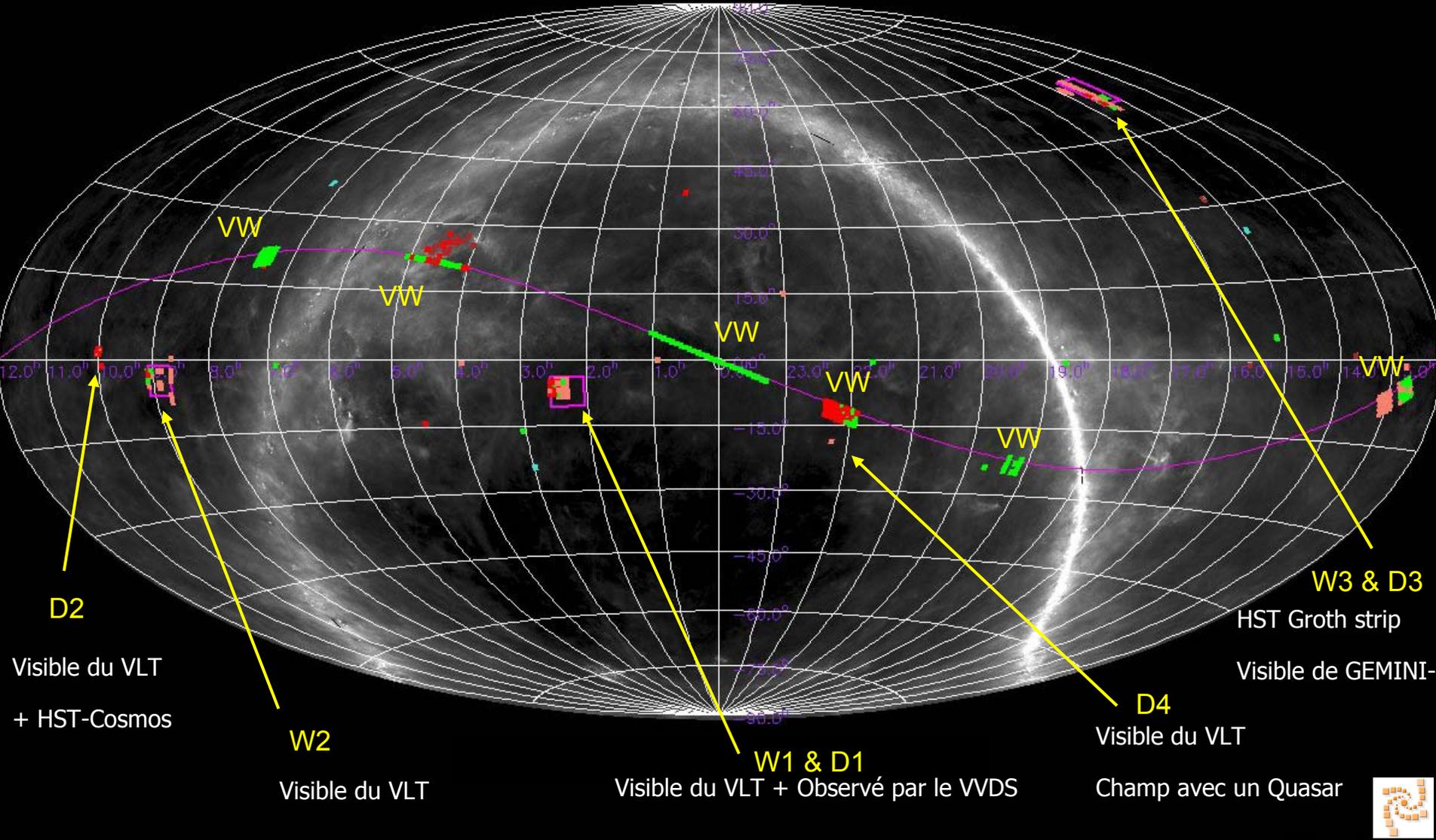


+command line : skywatcher



Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey: Canada-France collaboration

- 3 champs W de 50 deg² (CFHTLS-Wide), 4 champs de 1 deg² (CFHTLS-Deep)
- 500 nuits entre Juin 2003 and Juin 2008 (temps de télescope CNRS/INSU+CNRC)



D2
Visible du VLT
+ HST-Cosmos

W2
Visible du VLT

W1 & D1
Visible du VLT + Observé par le VWDS

D4
Visible du VLT

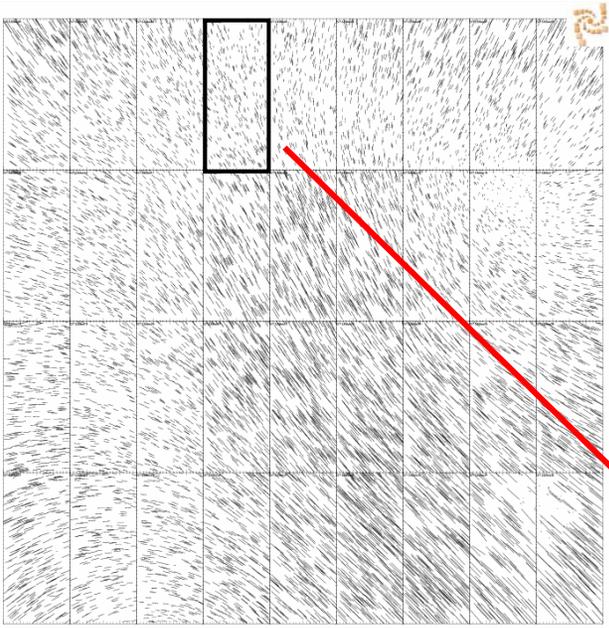
W3 & D3
HST Groth strip
Visible de GEMINI-

Champ avec un Quasar



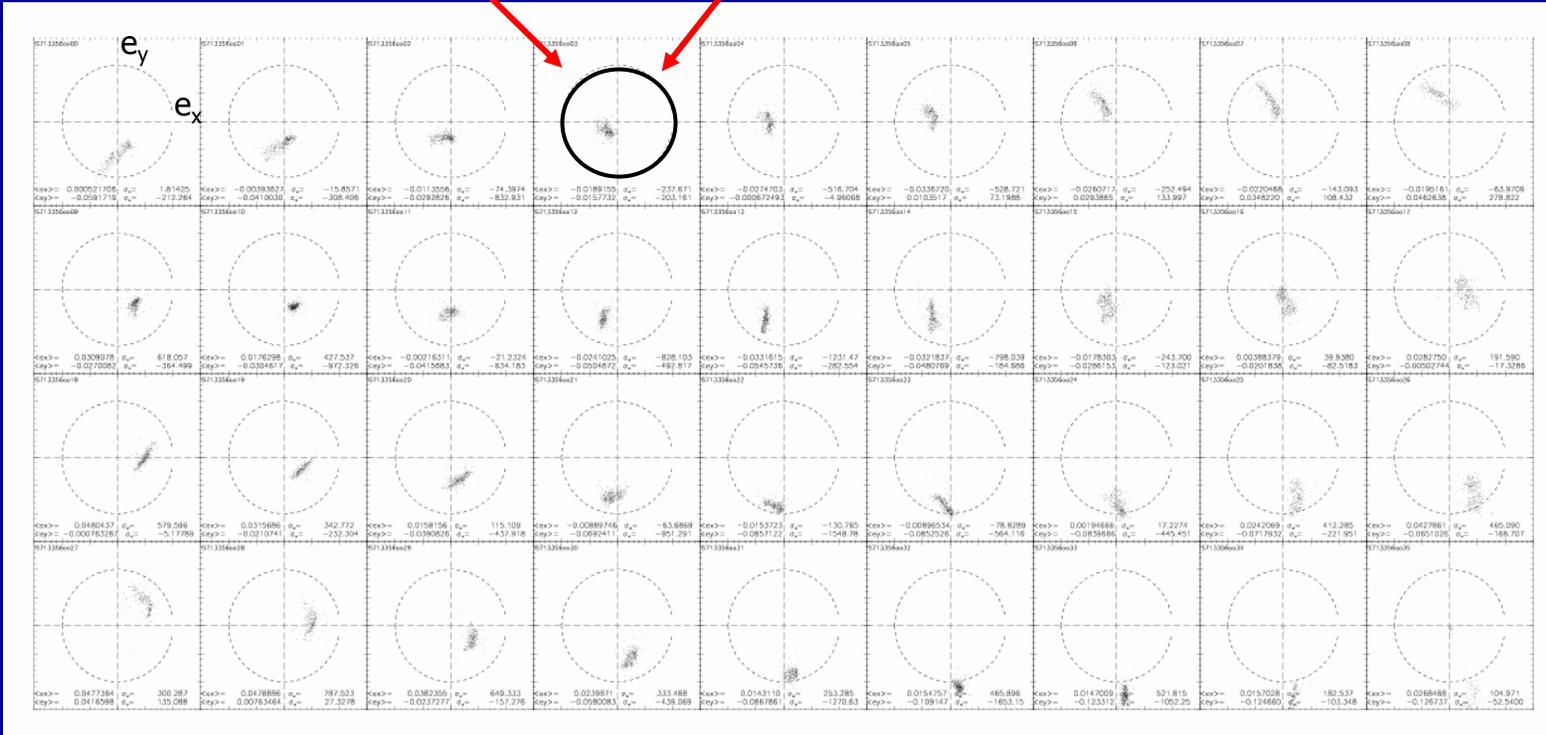
+command line : skywatcher

La qualité d'image de MegaPrime et les spécifications scientifiques pour les distorsions cosmologiques



Amplitude de l'ellipticité des étoiles et limites acceptables

Un champ stellaire Megacam

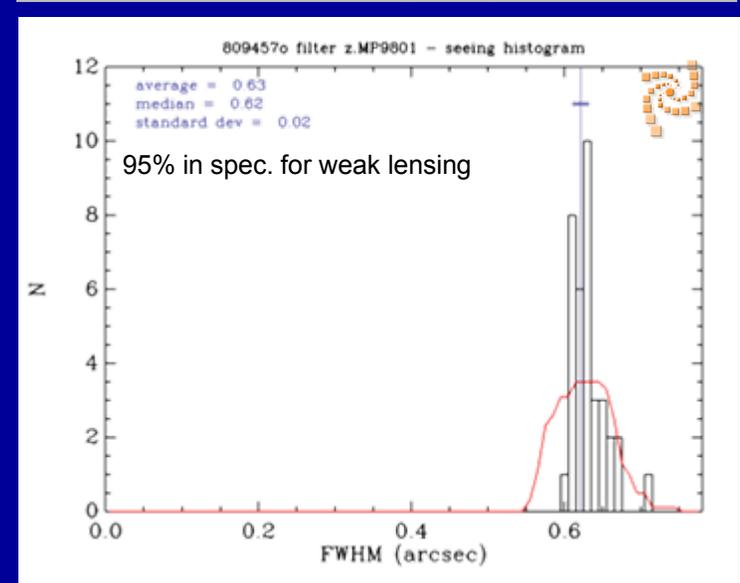
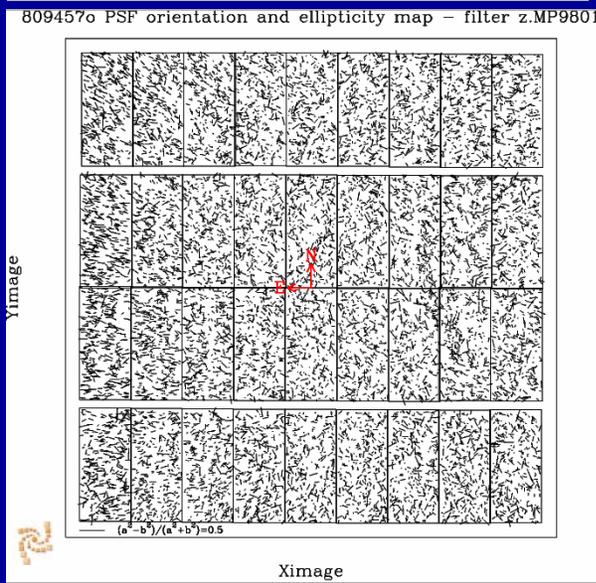
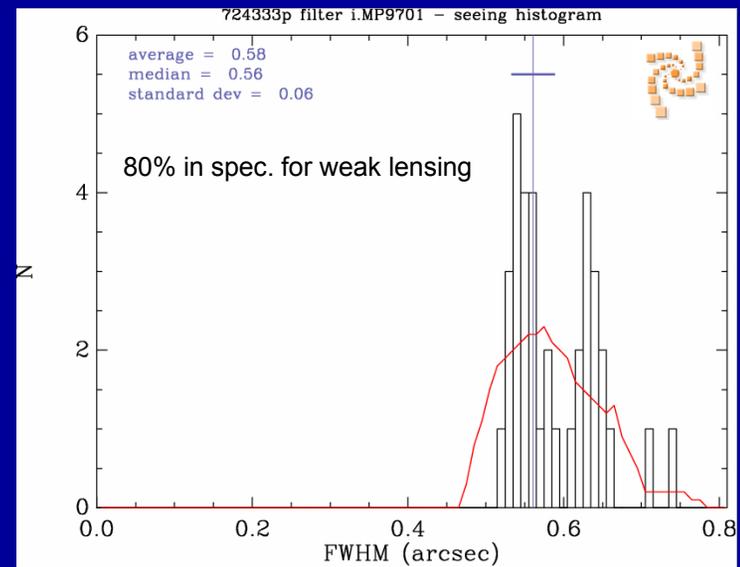
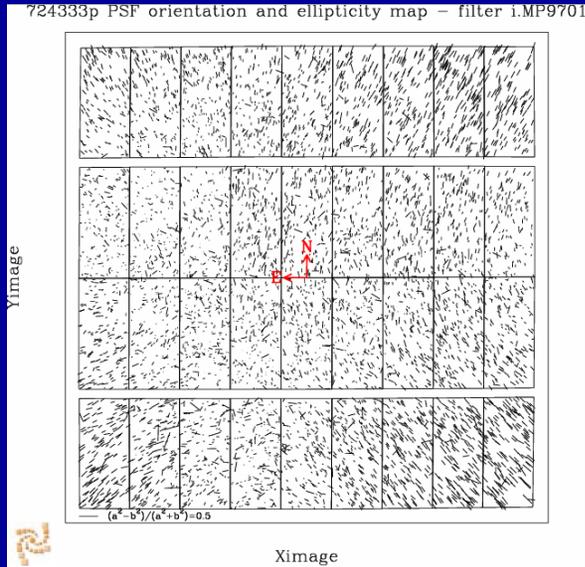


Ellipticité de la PSF :
 $e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$

36 carrés, 1 par CCD

Etude de la qualité d'image de MegaPrime: juin 2002 à août 2005

CFHT WFC → Analyse at Terapix → CFHT WFC

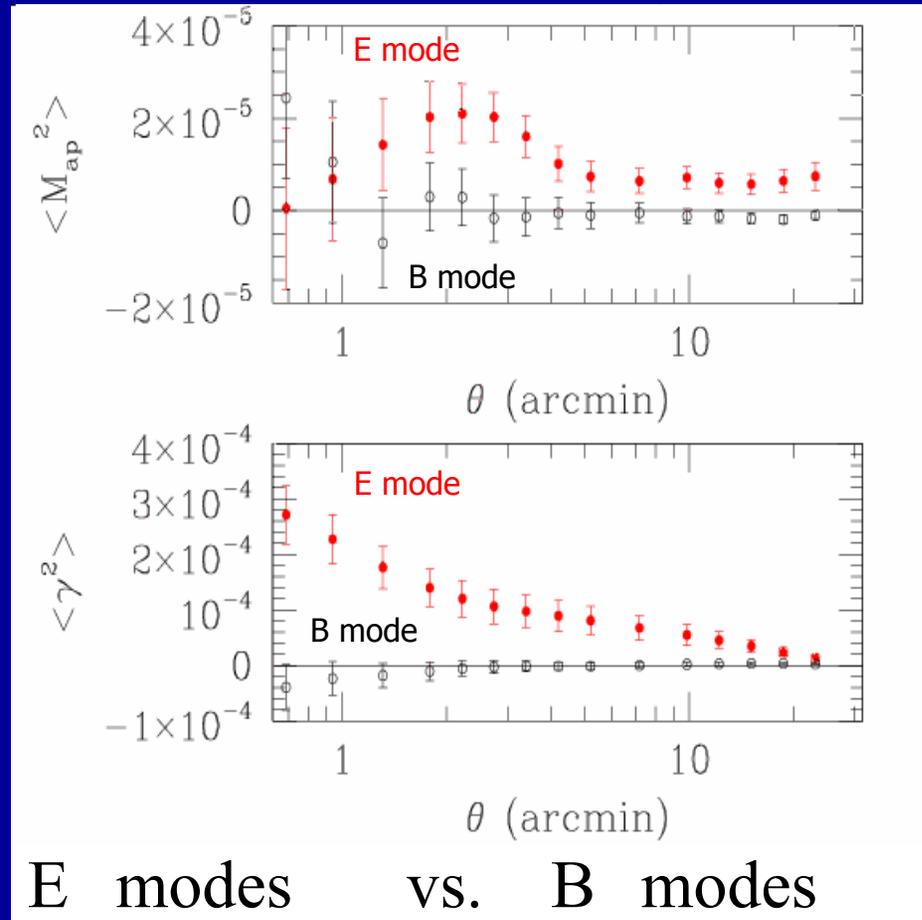


Fiabilité des mesures de cisaillement gravitationnel

- 2 chaînes de traitement indépendante:
 - Une au Canada (UVic+UBC+Waterloo), une en France (IAP)
 - Les deux chaînes calibrent et produisent leurs images différemment
 - L'analyse du cisaillement gravitationnel est faite indépendamment
- Les deux chaînes contrôlent les systématiques (B-modes et corrélation $\langle e^* \text{ shear} \rangle = 0$).
- Les deux chaînes mesurent trois types de statistiques
- Puis comparaison entre les deux chaînes
- Deep: contrôle achromaticité avec des images dans des filtres différents
- Comparaison avec des mesures des relevés précédents (VIRMOS-Descart)

Analyse des champs CFHTLS profonds (“Deep”)

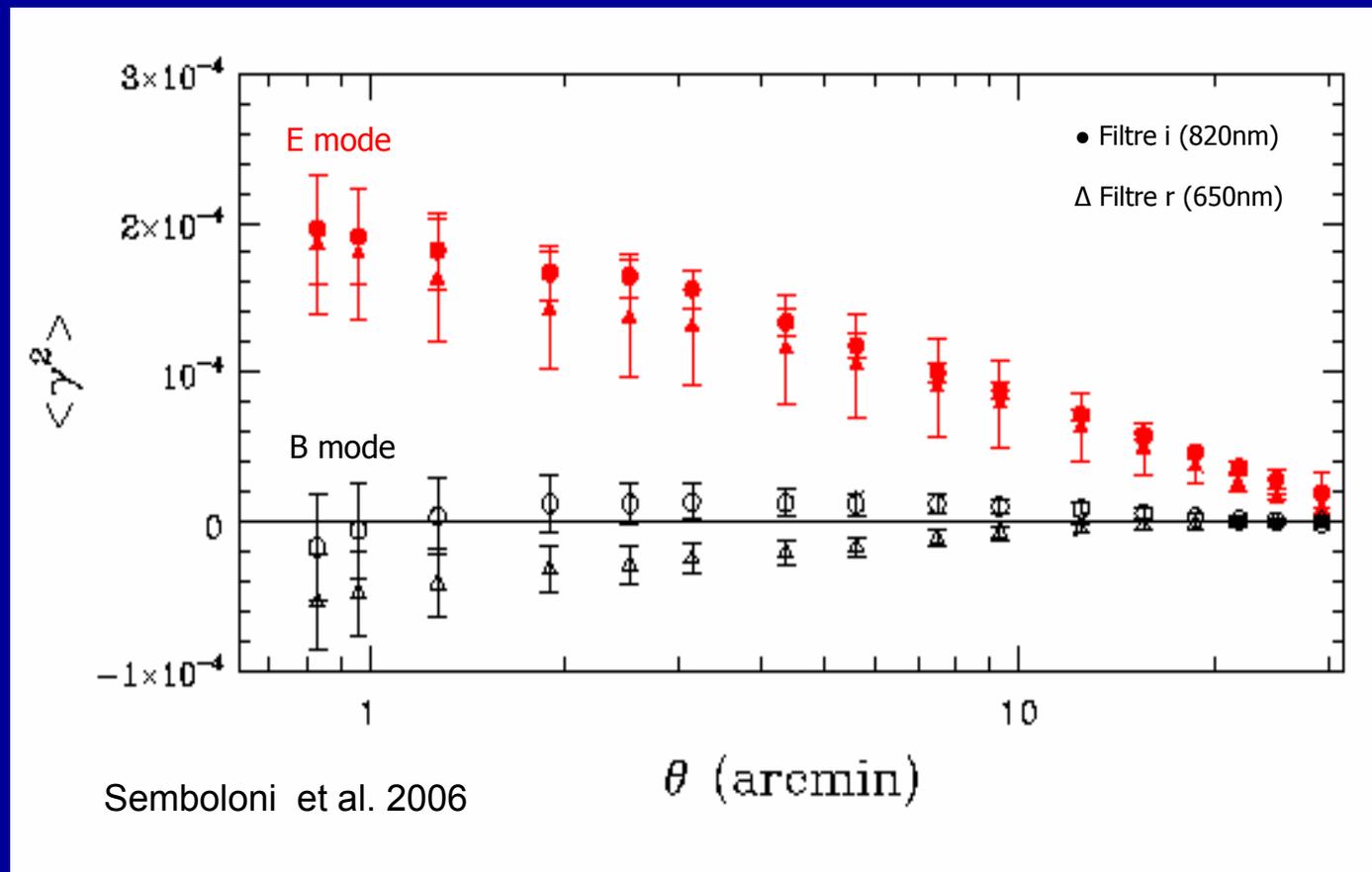
(Terapix release T0001)



- ✓ Aire du ciel couverte 2.1 degrees²
- ✓ Magnitudes des objets: 21.5 < R < 25.5
- ✓ Densité de galaxies 23 gal / arcmin²

Comparaison du signal dans les filtres r and i :

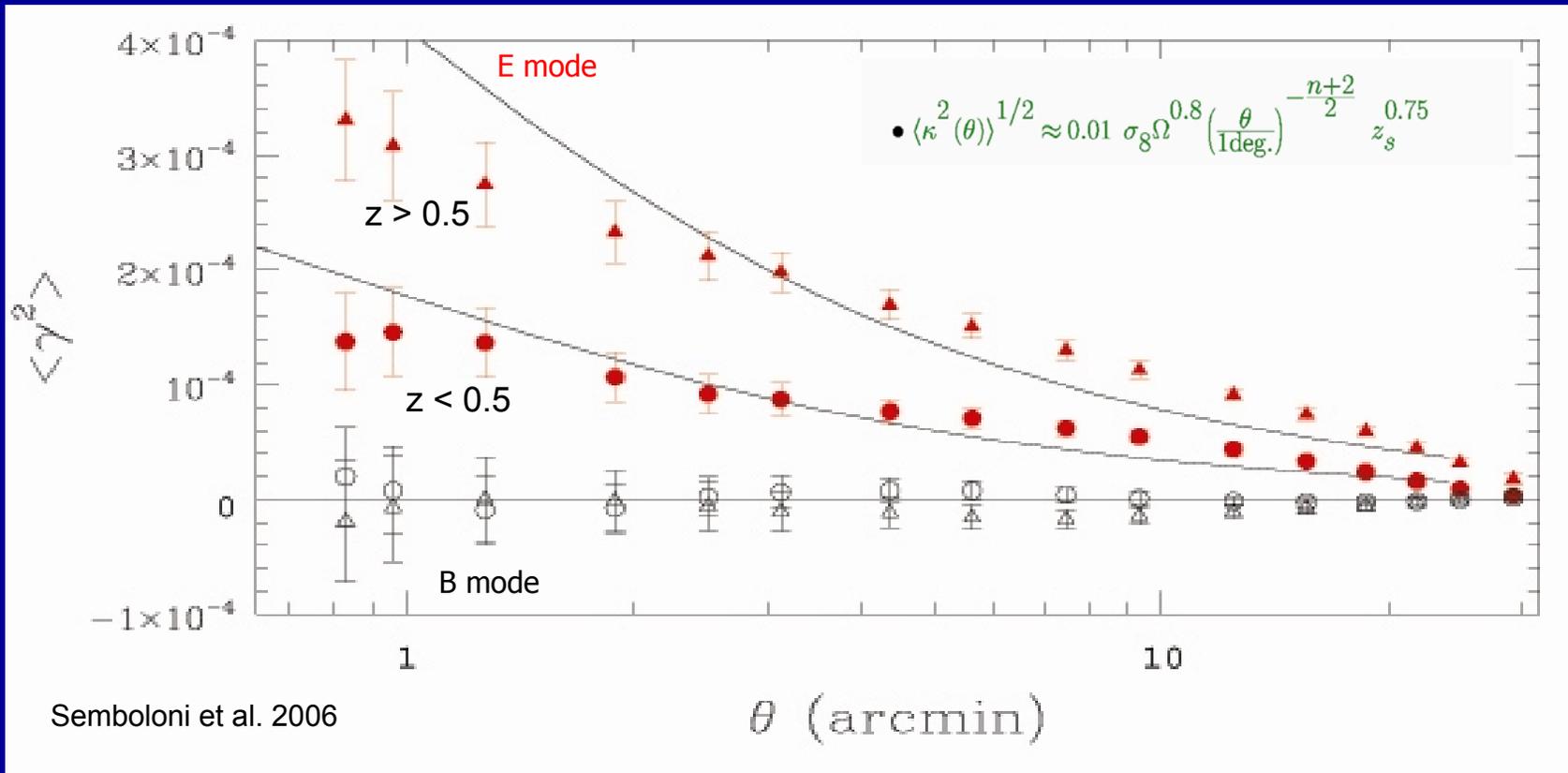
confirmation: les mesures sont achromatiques



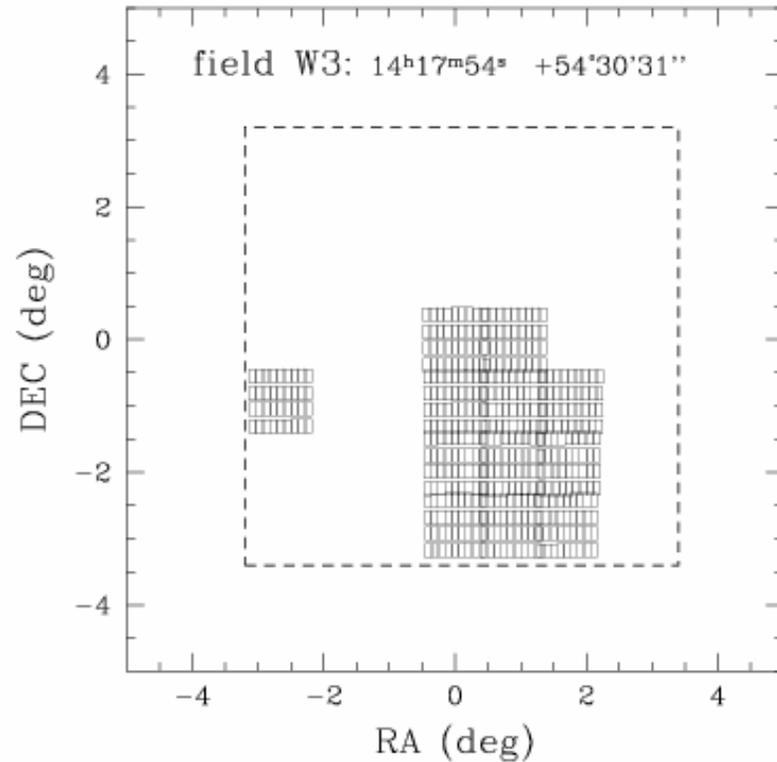
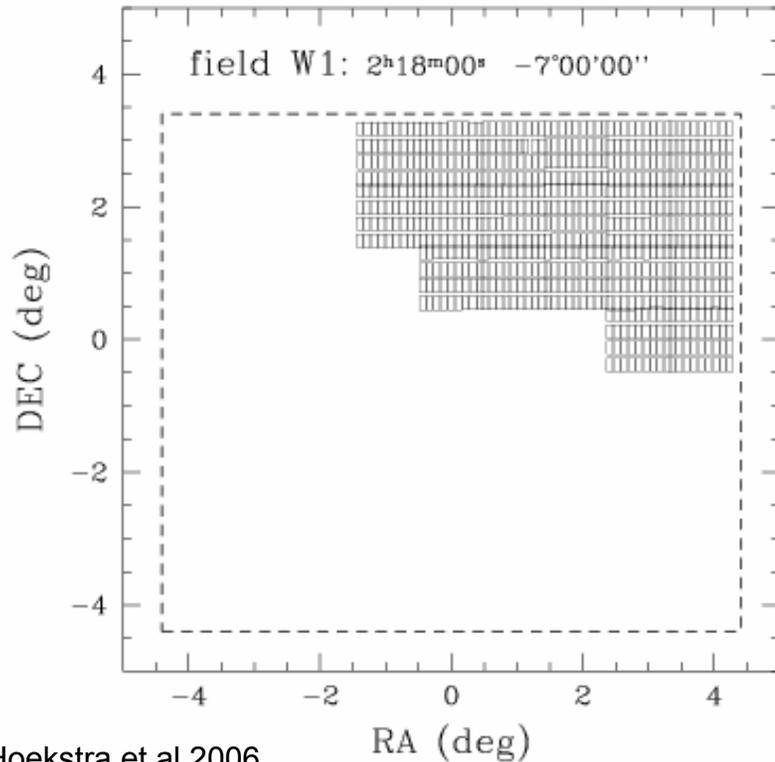
- Images i et r band traitées indépendamment
- Comparaison des catalogues portant sur les mêmes galaxies

Evolution du signal avec le redshift:

démonstration de la nature cosmologique du signal



Analyse du CFHTLS Wide

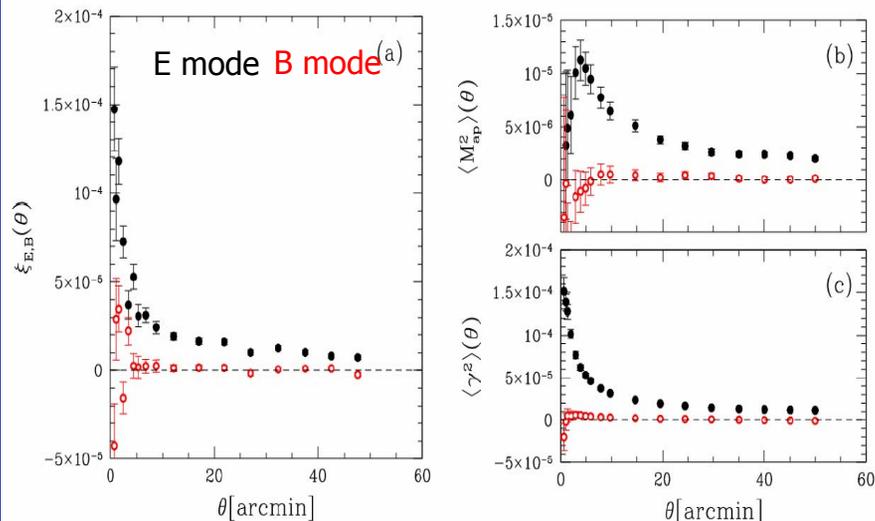


Hoekstra et al 2006

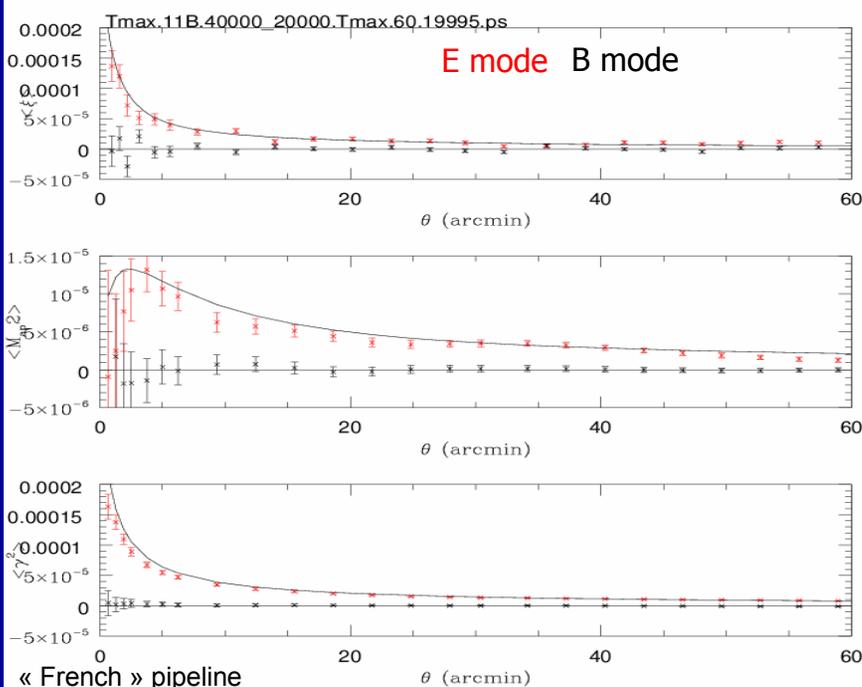
Total: $\sim 25 \text{ deg}^2$

Analyse du CFHTLS Wide:

Comparaison des deux chaînes d'analyse

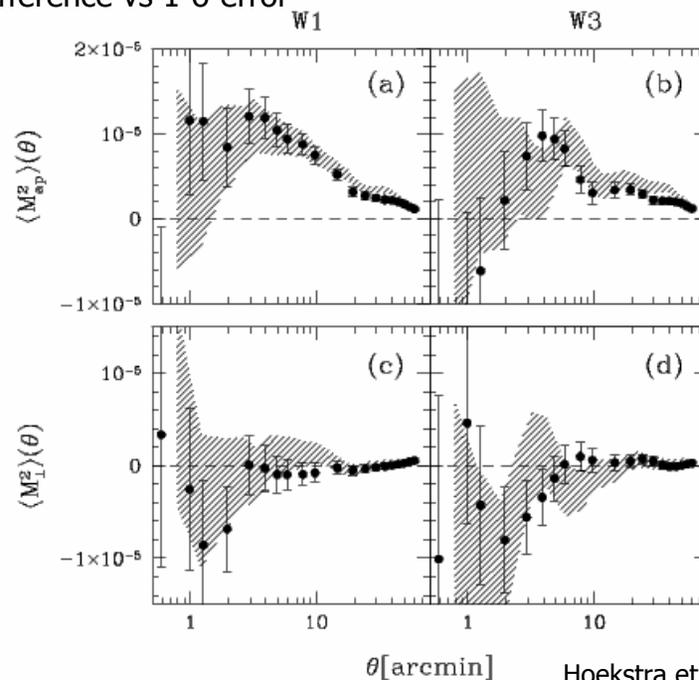


« Canadian » pipeline



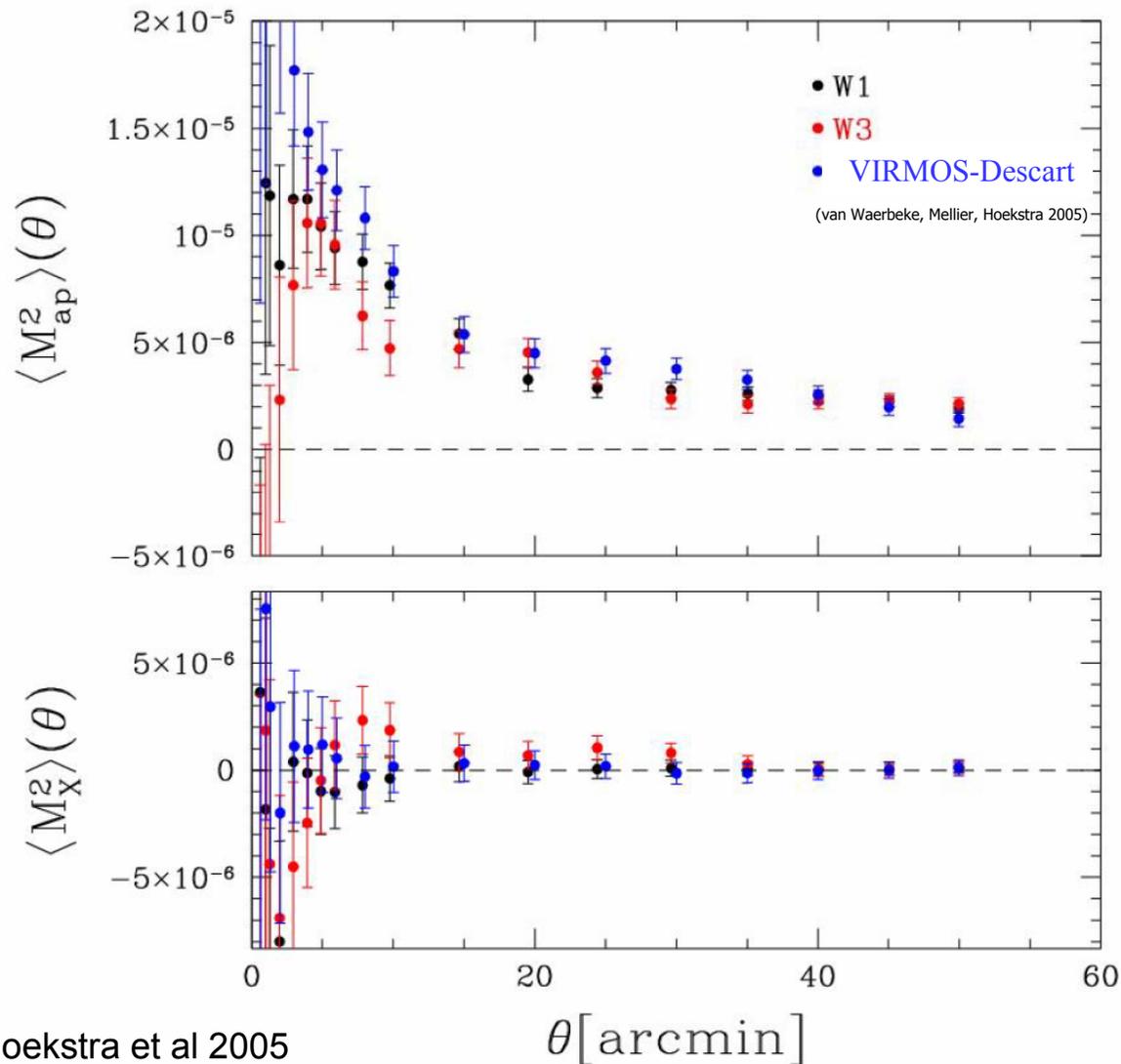
« French » pipeline

Difference vs 1- σ error



Hoekstra et al 2005

Comparaison avec le relevé VIRMOS-Descart



Résumé

- Les 2 chaînes d'analyse donnent des résultats identiques ; ces résultats sont identiques aux analyses passées du relevé Virgos-Descart: mesures robustes et fiables
- Pas de B-modes : aucune systématique résiduelle mise en évidence
- Pas de B-mode sur les échelles de 30'' à 50' : le signal est sans doute produit par la gravitation
- Effet achromatique : effet de lentille gravitationnelle
- Le signal
 - A l'amplitude et la forme prédite par les scénarios de formation des structures par instabilité gravitationnelle et un univers dominé par de la matière noire froide.
 - Croît avec le décalage spectral comme le prédit la théorie des lentilles gravitationnelles

Effet de distorsion gravitationnelle
cosmologique

Cosmologie avec le cisaillement gravitationnel du CFHTLS

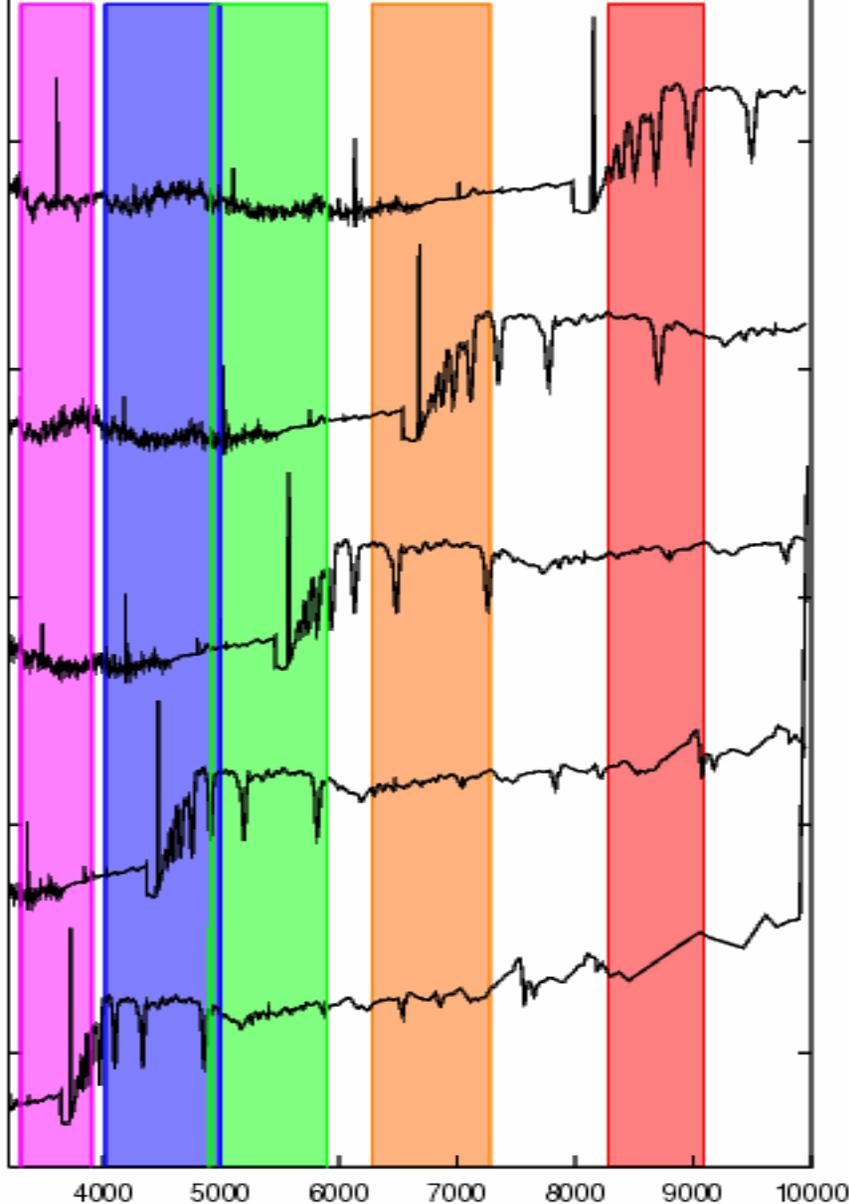
- Champs de la première saison délivrée par Terapix:
 - W1 et W3
 - D1, D2 et D3

$$\bullet \langle \kappa^2(\theta) \rangle^{1/2} \approx 0.01 \sigma_8 \Omega^{0.8} \left(\frac{\theta}{1 \text{deg.}} \right)^{-\frac{n+2}{2}} z_s^{0.75}$$

Une inconnue: la distribution des objets dans l'espace, en fonction du décalage spectral

Redshifts
photométriques extraits
des observations
optiques et infrarouges
du Hubble Deep Field

Position et largeur des filtres du CFHTLS



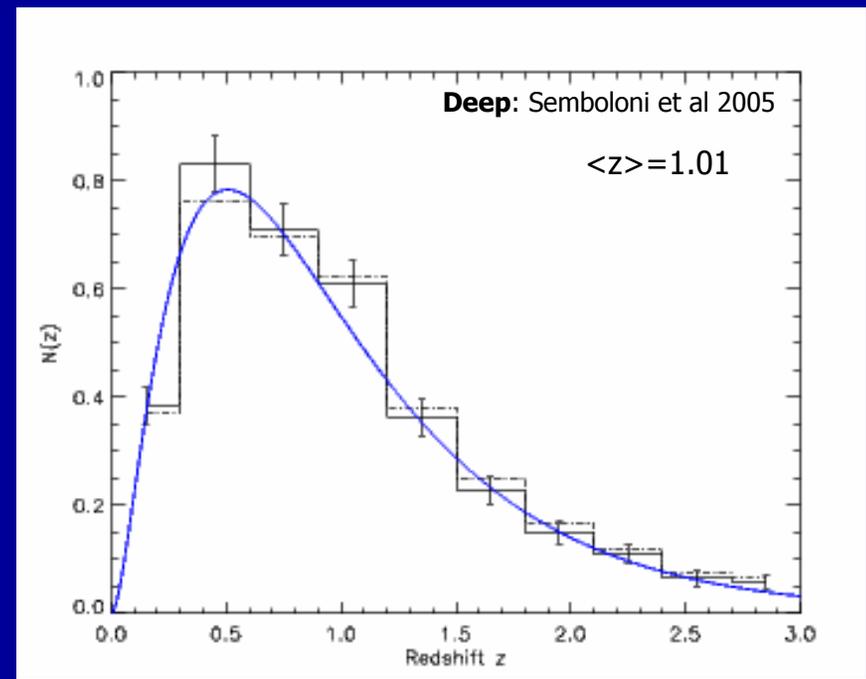
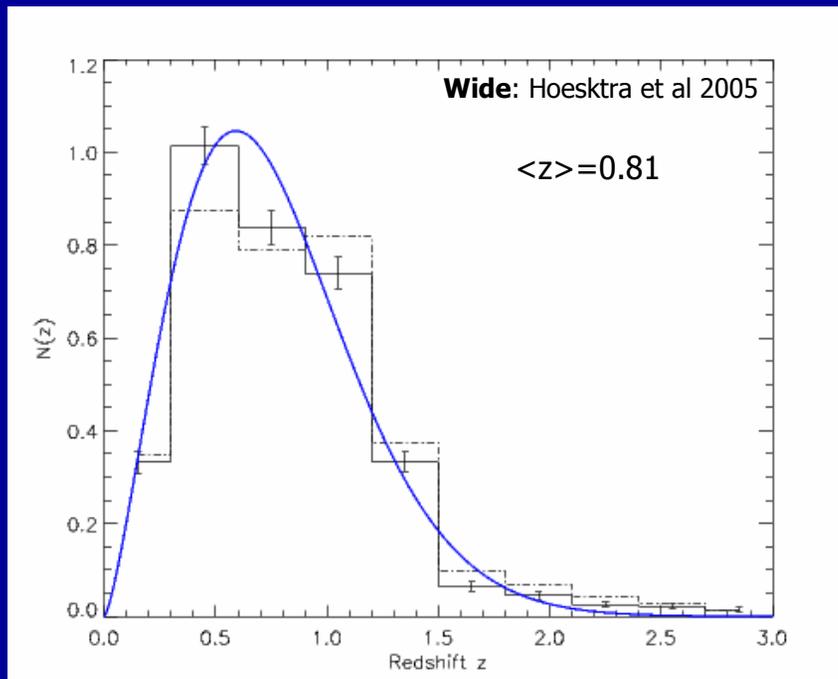
Une inconnue: la distribution des objets dans l'espace, en fonction du décalage spectral

Redshifts photométriques extraits des observations optiques et infrarouges du Hubble Deep Field

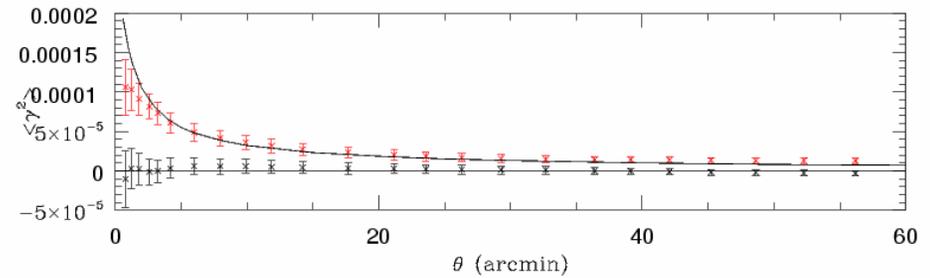
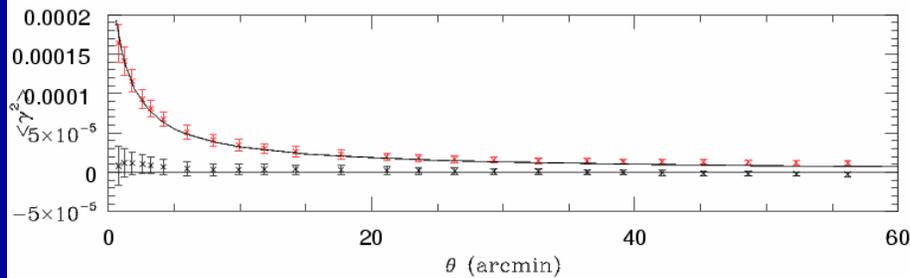
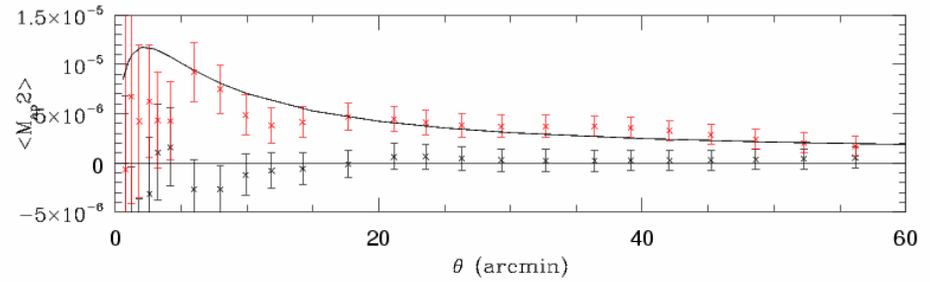
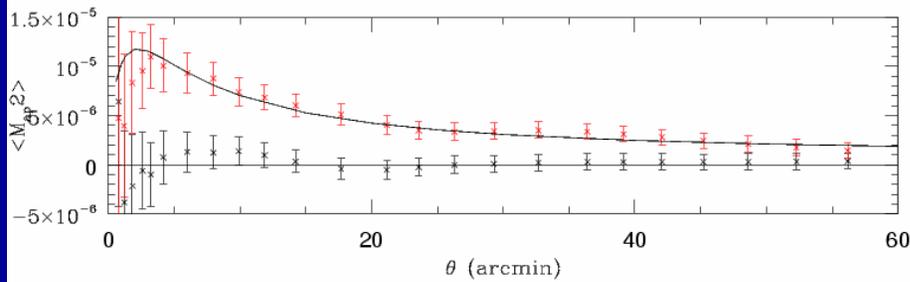
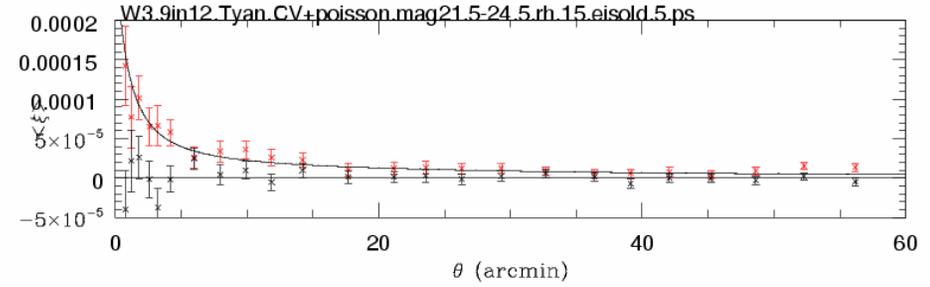
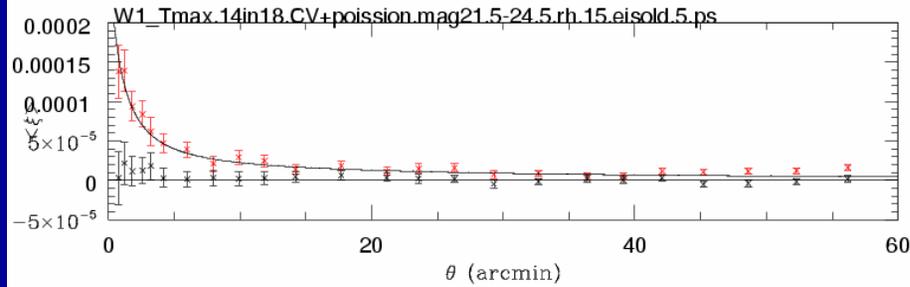
Une inconnue: la distribution des objets dans l'espace, en fonction du décalage spectral

Redshifts photométriques extraits des observations optiques et infrarouges du Hubble Deep Field

$$\bullet \langle \kappa^2(\theta) \rangle^{1/2} \approx 0.01 \sigma_8 \Omega^{0.8} \left(\frac{\theta}{1 \text{ deg.}} \right)^{-\frac{n+2}{2}} z_s^{0.75}$$



CSLS et modèle de « concordance » à partir de WMAP-1

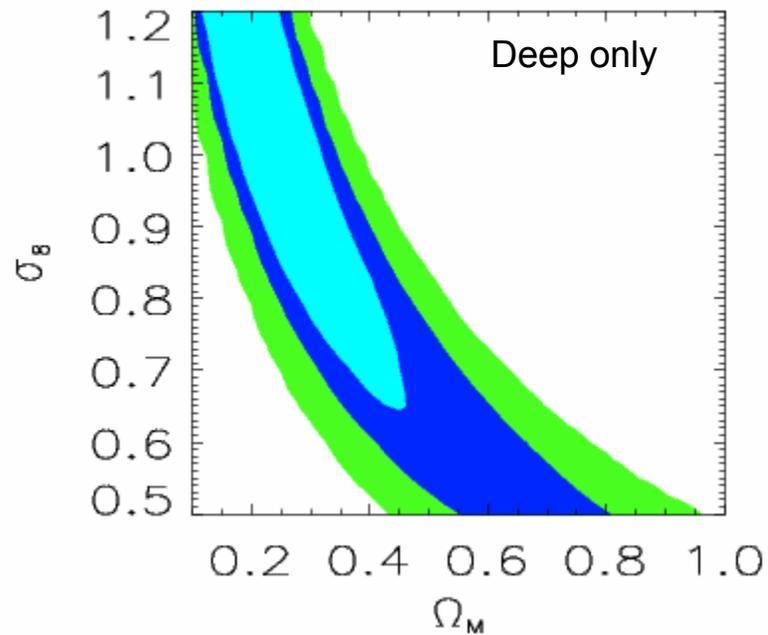


- Courbe noire: $\sigma_8=0.85$; $\Omega_m=0.27$; $\Lambda=0.73$; $h=0.71$; $\langle z_s \rangle=0.85$; $\sigma_\epsilon=0.36$; $n_{gal}=15 \text{ gal/arcmin}^2$
- Erreurs: Poisson+variance cosmique

Distorsions cosmologiques dans le CFHTLS

spectre de puissance et
propriété de la composante
matière noire

CSLS: contraintes sur $\Omega_m - \sigma_8$



- $\langle \kappa^2(\theta) \rangle^{1/2} \approx 0.01 \sigma_8 \Omega^{0.8} \left(\frac{\theta}{1 \text{ deg.}} \right)^{-\frac{n+2}{2}} z_s^{0.75}$
- $\langle \kappa^2(\theta) \rangle = \langle \gamma^2(\theta) \rangle$

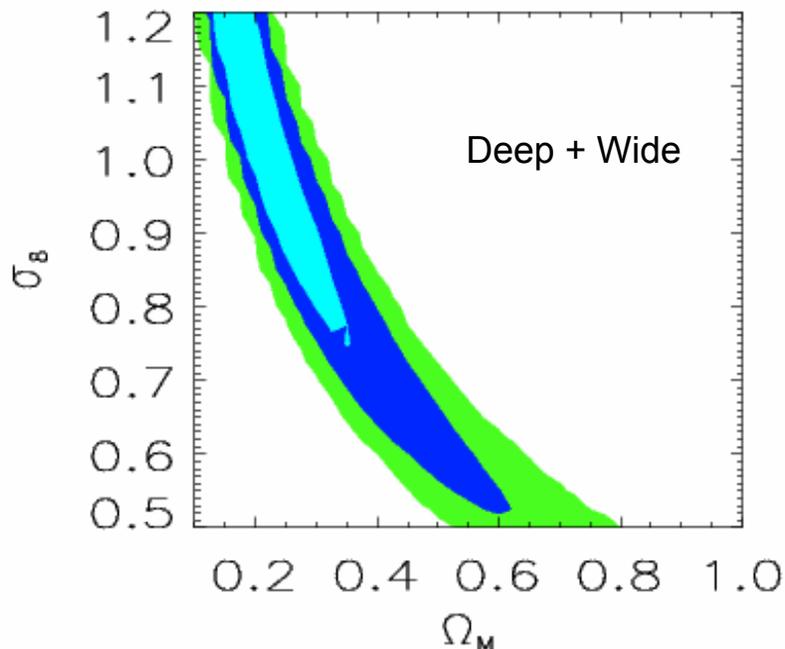
Deep+Wide si $\Omega_m = 0.3$:

$$\sigma_8 = 0.89 \pm 0.06 \text{ (P\&D)}$$

$$\sigma_8 = 0.86 \pm 0.05 \text{ (Halo fit)}$$

Aire du Deep: 2.1 deg²

Aire du Wide : 22 deg²



σ_8 avec le CSLS

Van Waerbeke et al 2005 (Virgos-Descart):

$$\sigma_8 = 0.83 \pm 0.07$$

Hoekstra et al 2003 (RCS):

$$\sigma_8 = 0.85 \pm 0.07$$

Sembolini et al (2006, CFHLS-Deep) +

Hoekstra et al (2006, CFHTLS-Wide):

$$\sigma_8 = 0.89 \pm 0.06 \text{ (P\&D)}$$

$$\sigma_8 = 0.86 \pm 0.05 \text{ (Halo fit)}$$

... sont en accord à 5%

Distorsions cosmologiques dans le CFHTLS

spectre de puissance et
propriété de la composante
énergie sombre

Modéliser l'énergie sombre

- Quantité ? : Ω_x
- Modéliser sa nature et ses propriétés :
 - Empirique mais très ouverte: équation d'état state (en supposant un fluide parfait): $P = w \rho$.
 - $w = w_0$ (constant) (CFHTLS : Semboloni et al 2005; Hoekstra et al 2005)
 - $w = w_0 + w_1(z)$ (variation temporelle simple).
 - Modèle théorique d'énergie sombre: en supposant par exemple un champ scalaire (CFHLS: see Schimd et al 2006) .

Permet de comprendre la physique dans le détail et inclut automatiquement l'évolution temporelle.

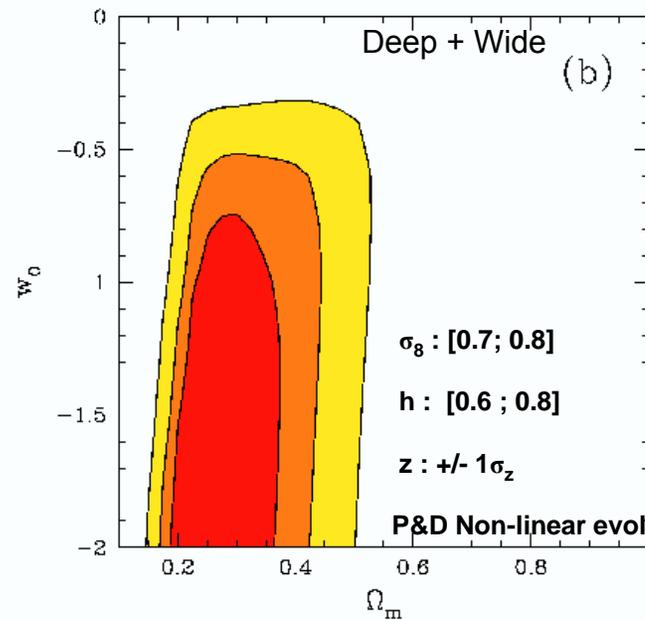
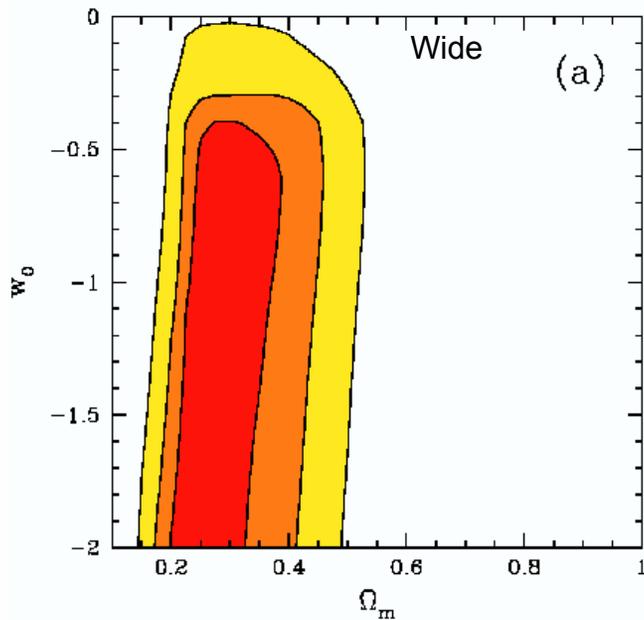
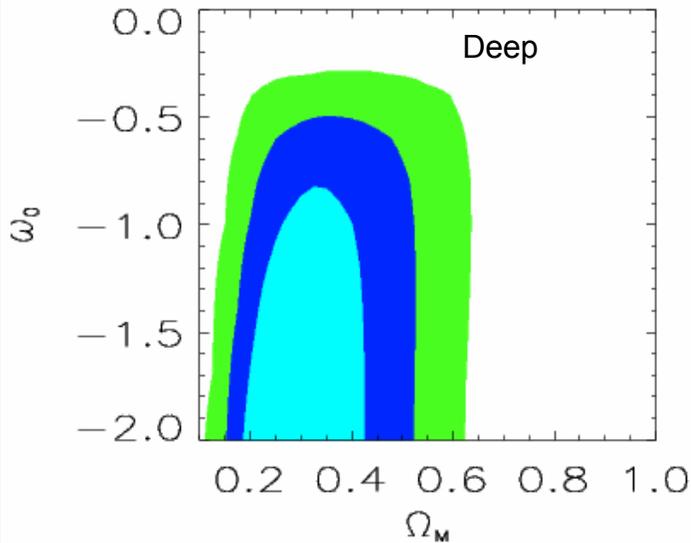
CSLS:

contraintes sur les
modèles empiriques:

$$P = w_0 \rho$$

Deep + Wide : $w_0 < -0.8$ (68%)

$w_0 < -0.4$ (99%)



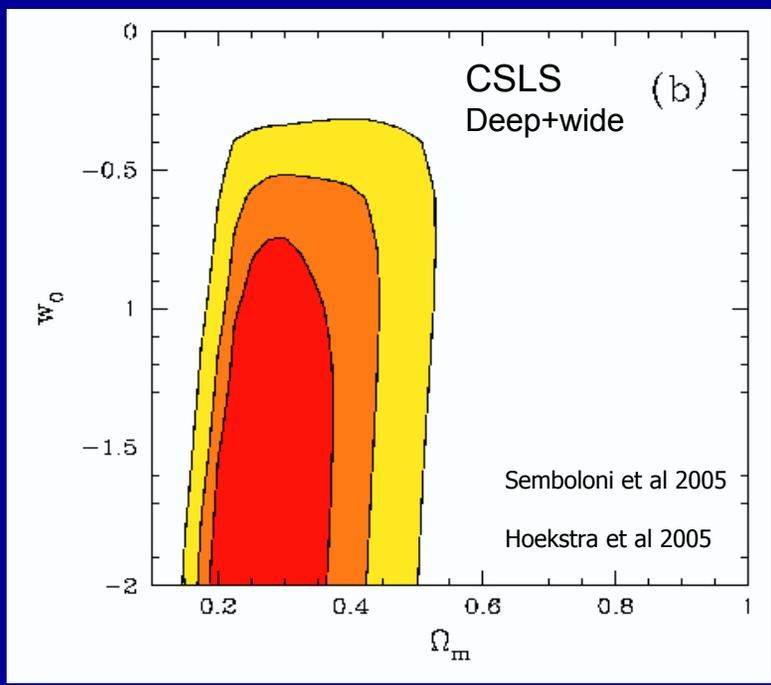
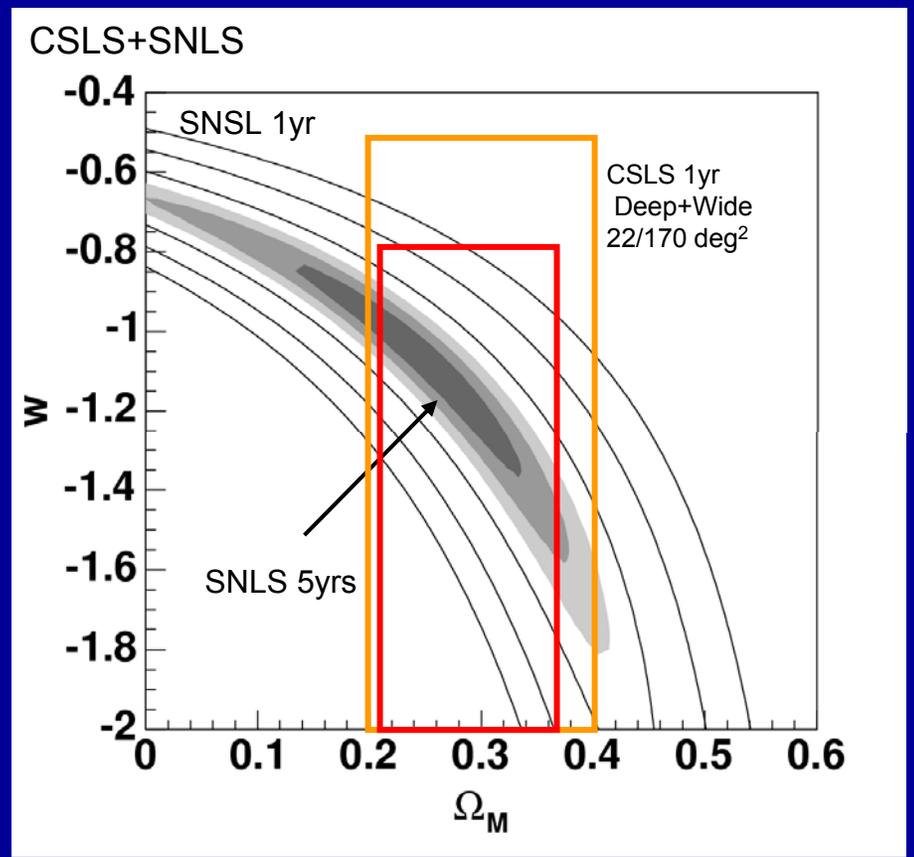
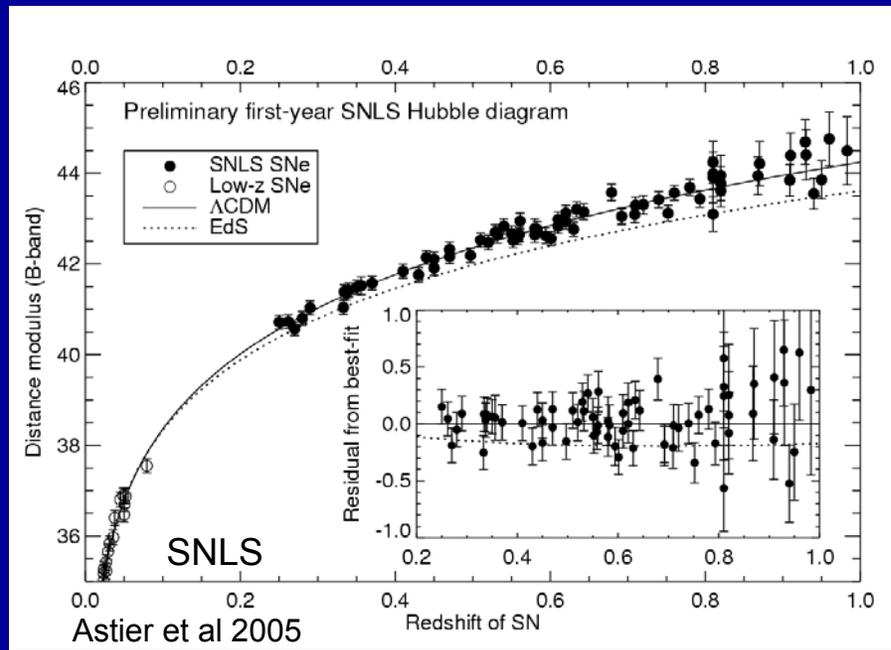
Hoekstra et al 2005 , Semboloni et al 2005

Univers plat

$$n = 1$$

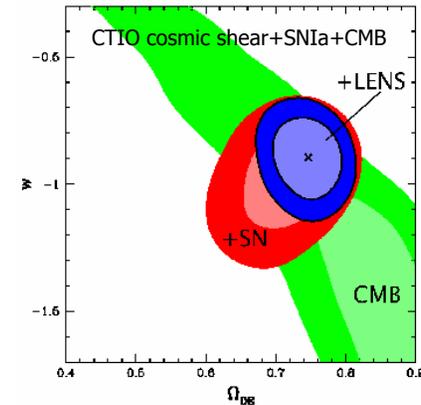
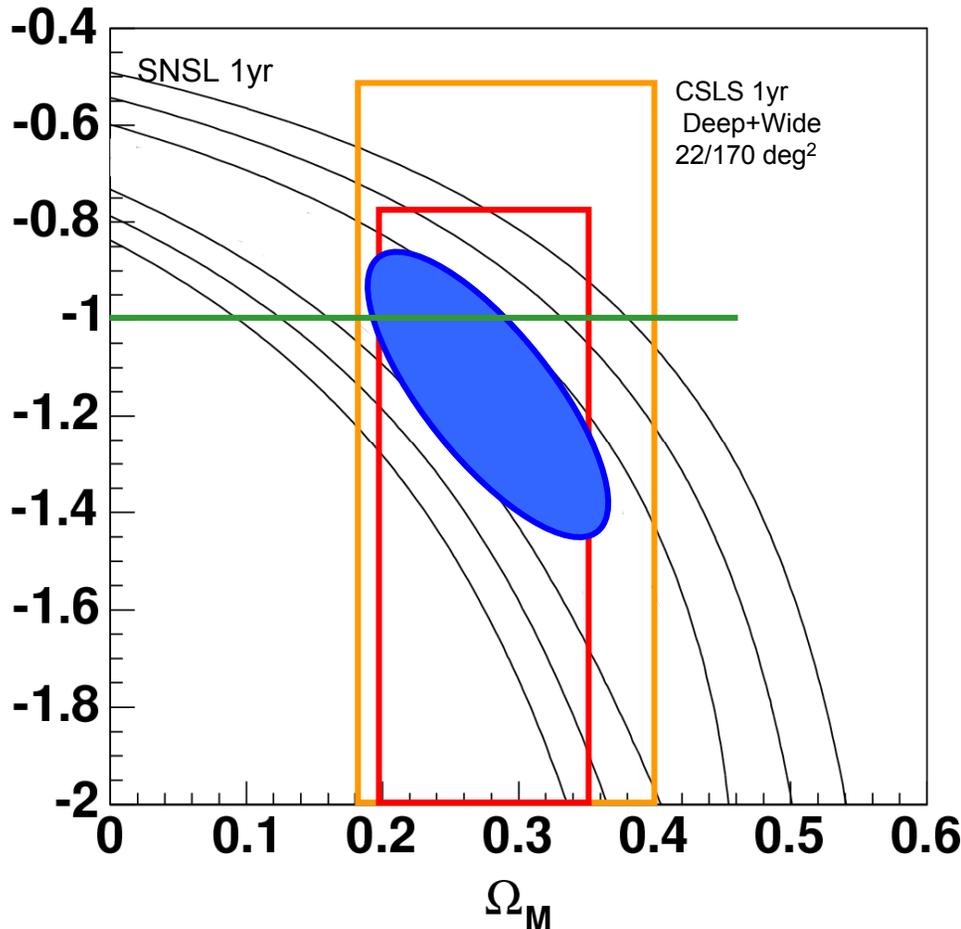
SNLS+CSLS

(SNLS: CFHTLS Supernovae Legacy Survey)

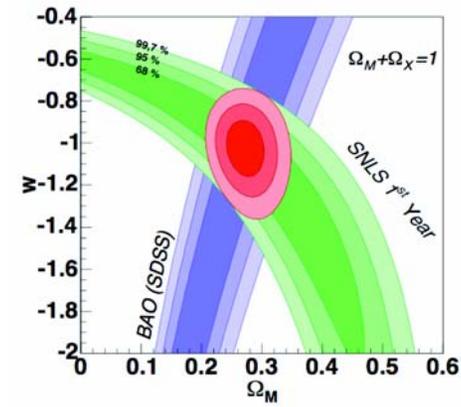


$w = -1$? (constant cosmologique)

CSLS+SNLS



Jarvis et al 2005



Astier et al 2005

... loin d'être si sur ...

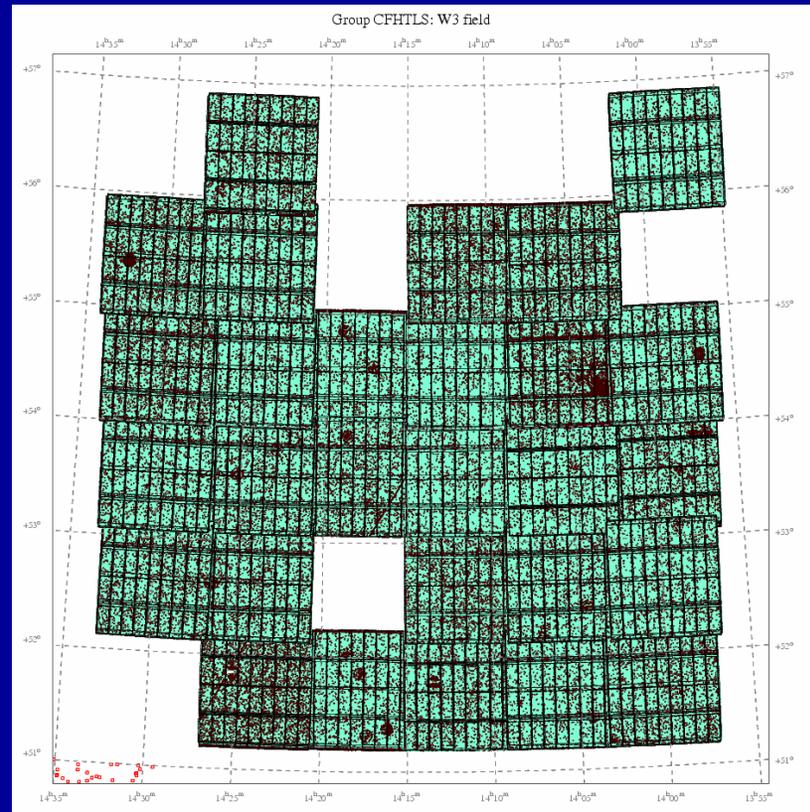
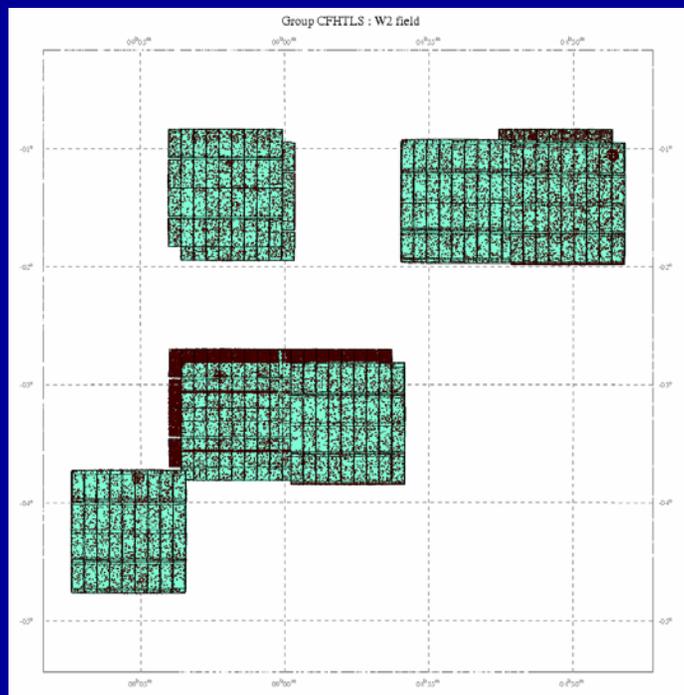
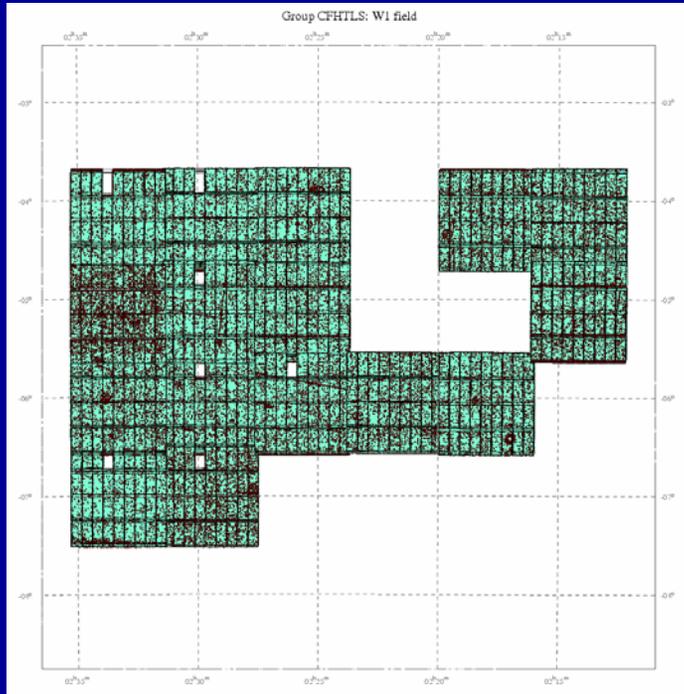
- Contraintes actuelles: suppose a priori que w est constant
- Les données sont encore trop imprécises pour que l'on puisse sonder l'évolution temporelle de w avec précision , au-delà de $z=1.5$
- Encore des incertitudes concernant les systématiques résiduelles

CFHTLS : l'avenir?

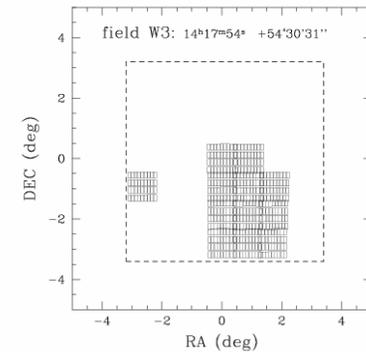
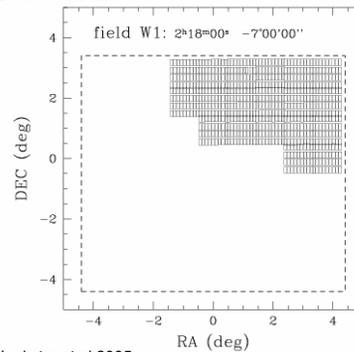
Le cisaillement gravitationnelle au-delà des échelles angulaires de 1 degré:

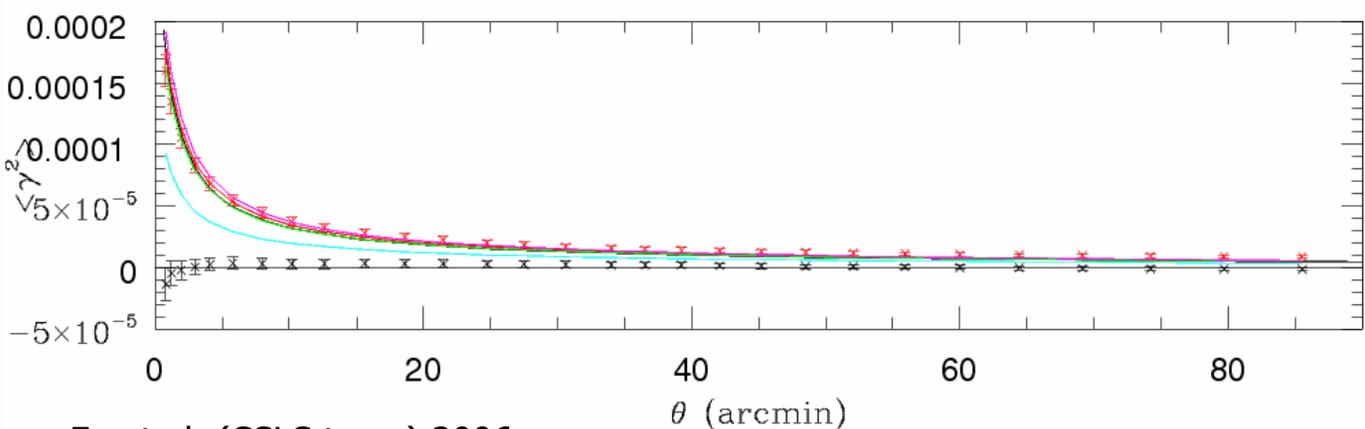
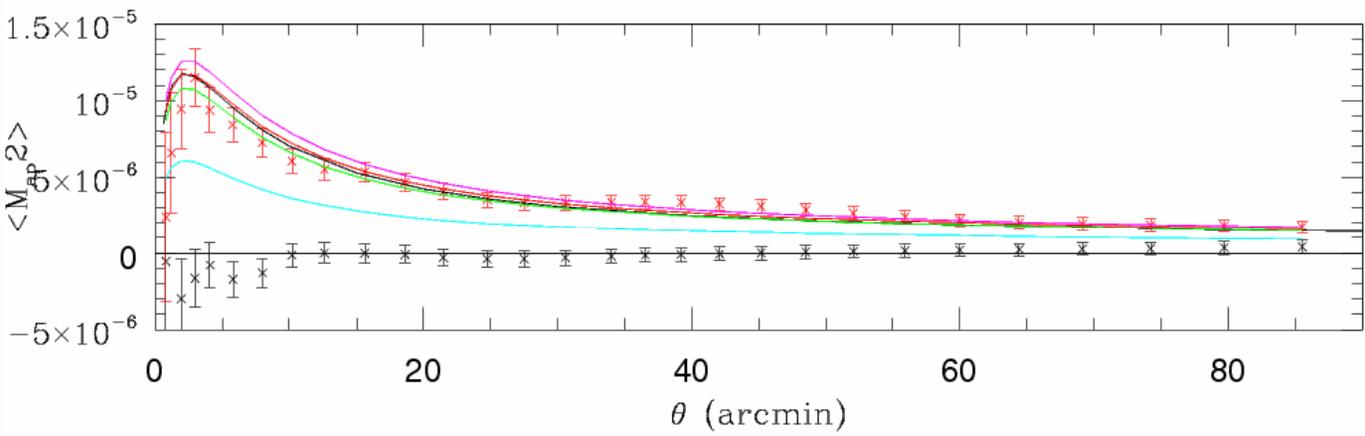
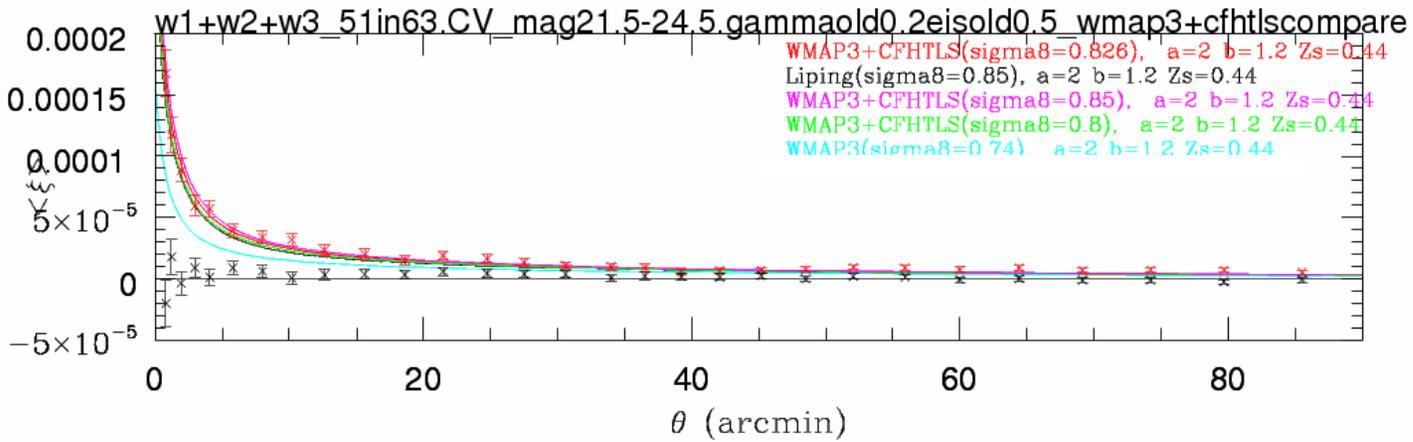
- très loin des effets non-linéaires
- besoin d'une intercalibration champ à champ
- le signal devient très faible et les intercalibrations difficiles: la qualité d'image est le facteur technique le plus critique

CFHTLS CSLS deuxième série



2005 data





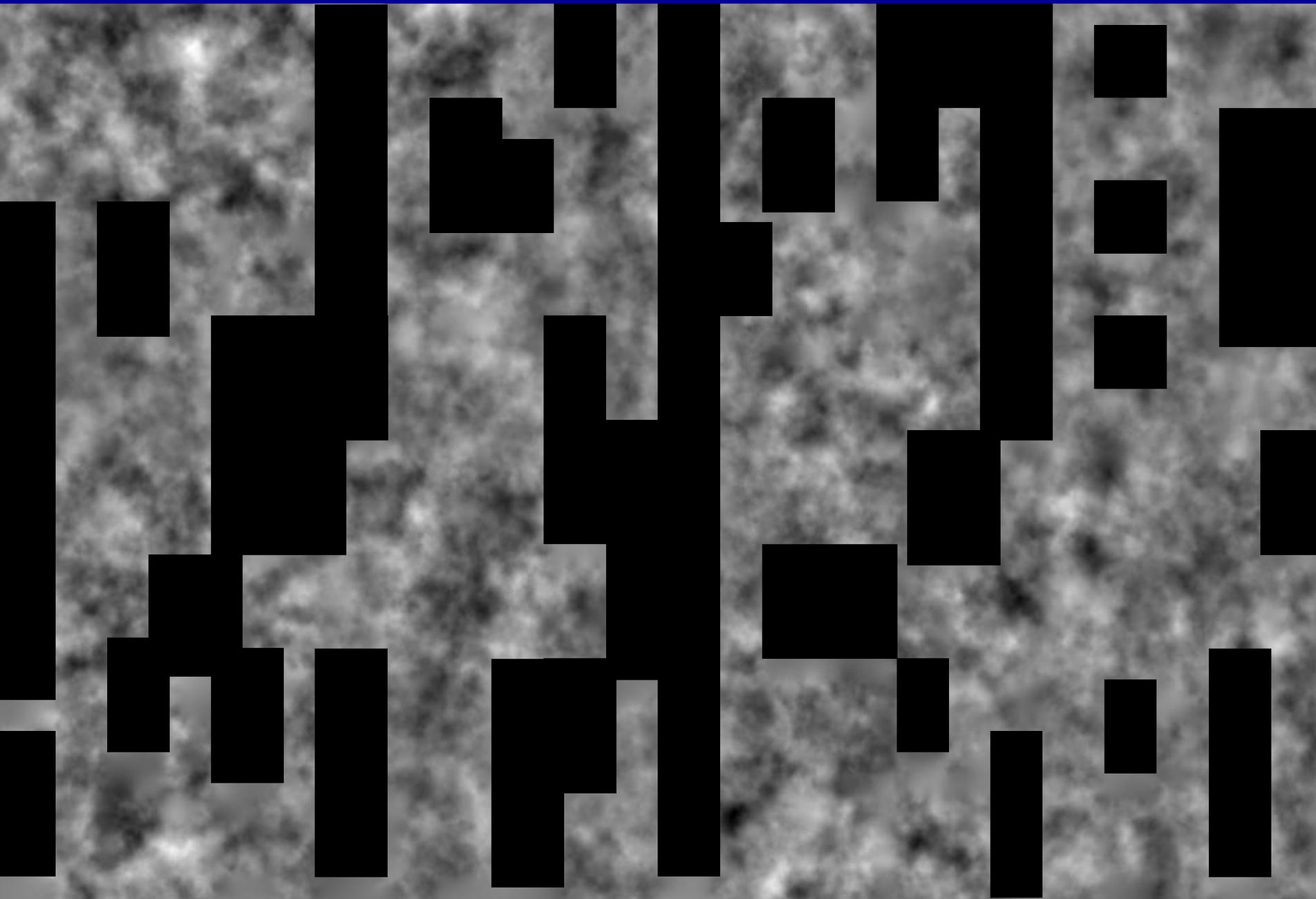
Au-dela de 1 degré

L'avenir au-delà du CFHTLS

CFHTLS cosmic shear: ce qu'il reste à faire

- Analyse complète de la distribution en distance des galaxies de tout le CFHLS
- Passer du spectre de puissance projeté sur la ciel au spectre tri-dimensionnel
- Construire une carte de la distribution de la matière noire , analogue à celle des galaxies
- Corrélation croisée spectre de la matière-spectre des galaxies: origine, histoire et mécanismes des relations matière-lumière
- Galaxy-galaxy lensing: propriétés des halos autour des galaxies
- Explorer $w(z)$ et les modèles physiques d'énergie sombre (Schimd et al 2006)

Une image de la distribution de la matière noire projetée sur le ciel (VIRMOS-Descart)



La prochaine génération des grands relevés de cisaillement gravitationnel cosmologique

- Objectif: propriétés de l'énergie sombre évaluées avec une précision de 5% à 1% (30%-10% aujourd'hui)
- Besoin de très grands champs
- Besoin d'analyse multi-plan sources (tomographie)
- Besoin de la distribution 3-D des galaxies
- Besoin d'un fort gain en précision sur la mesure de forme des galaxies

Les grands projets optique/infrarouge

Survey	Sq. Degrees	Filters	Depth	Dates	Status
CTIO	75	1	shallow		published
VIRMOS	9	1	moderate		published
COSMOS	2 (space)	1	moderate		complete
DLS (NOAO)	36	4	deep		complete
Subaru	30?	1?	deep	2005?	observing
CFH Legacy	170	5	moderate	2004-2008	observing
RCS2 (CFH)	830	3	shallow	2005-2007	approved
VST/KIDS/ VISTA/VIKING	1700	4+5	moderate	2007-2010?	50%approved
DES (NOAO)	5000	4	moderate	2008-2012?	proposed
Pan- STARRS	~10,000?	5?	moderate	2006-2012?	~funded
LSST	15,000?	5?	deep	2010-2020?	proposed
JDEM/SNAP	1000+ (space)	9	deep	2013-2018?	proposed
VST/VISTA	5000?	4+5	moderate	2010-2015?	proposed
DUNE	20000? (space)	2+1?	moderate	2012-2015?	proposed

KIDS + CFHTLS Wide + CFHTLS Deep: 3 lens planes



Dark UNiverse Explorer PI: Réfrégier



dapnia

Weak Lensing:

C_1 measurement in 3 z-bins

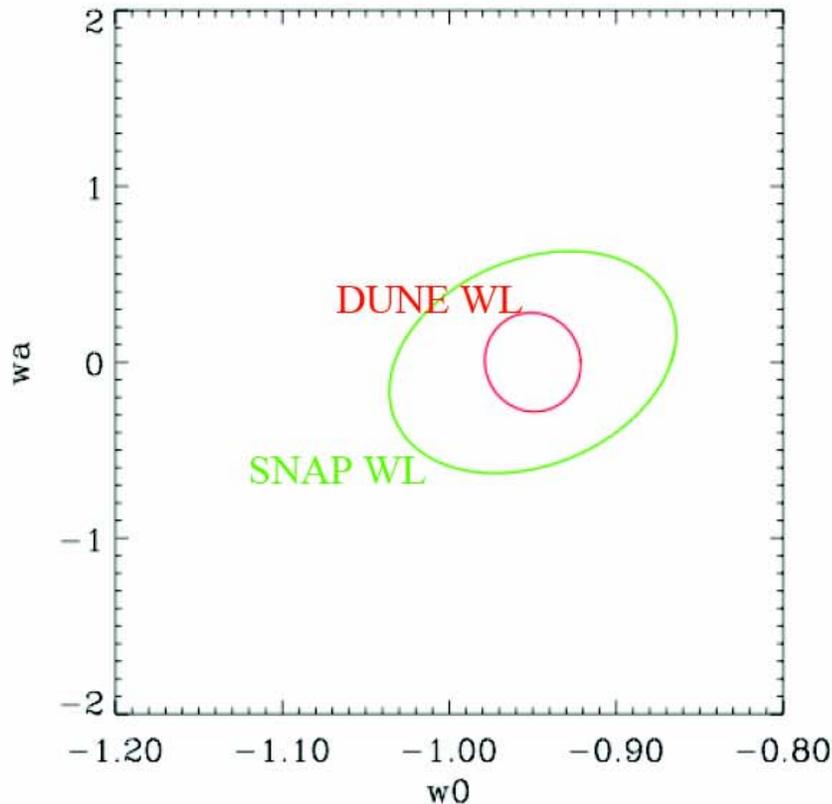


Photo-z errors of $\Delta z=0.1$

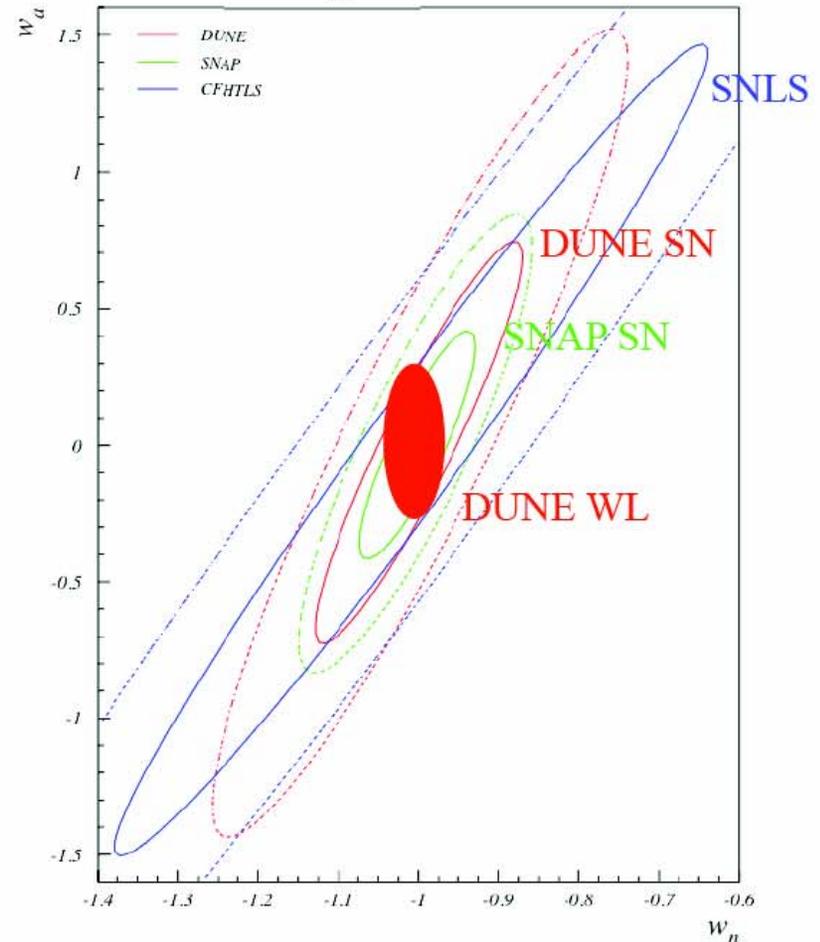
No priors

Supernovae:

Prior: $\Delta\Omega_m=0.03$



By Amara et al.



By Pain, Kroely, Astier, Antilogus, Barrelet et al.

Dark energy evolution: $w(a) = w_0 + (a_n - a)w_a$, $a_n = 0.6$ assume a flat universe