

Les lentilles gravitationnelles: Sondes hypersensibles de l'Univers



Remi Cabanac

6 avril 2013

Les lentilles gravitationnelles: Sondes hypersensibles de l'Univers

Plan

Prolégomènes

Partie I: histoire et théorie

Partie II: observations et applications

Prolégomènes

Cosmologie Primordiale, Peters, Uzan, Belin 2006

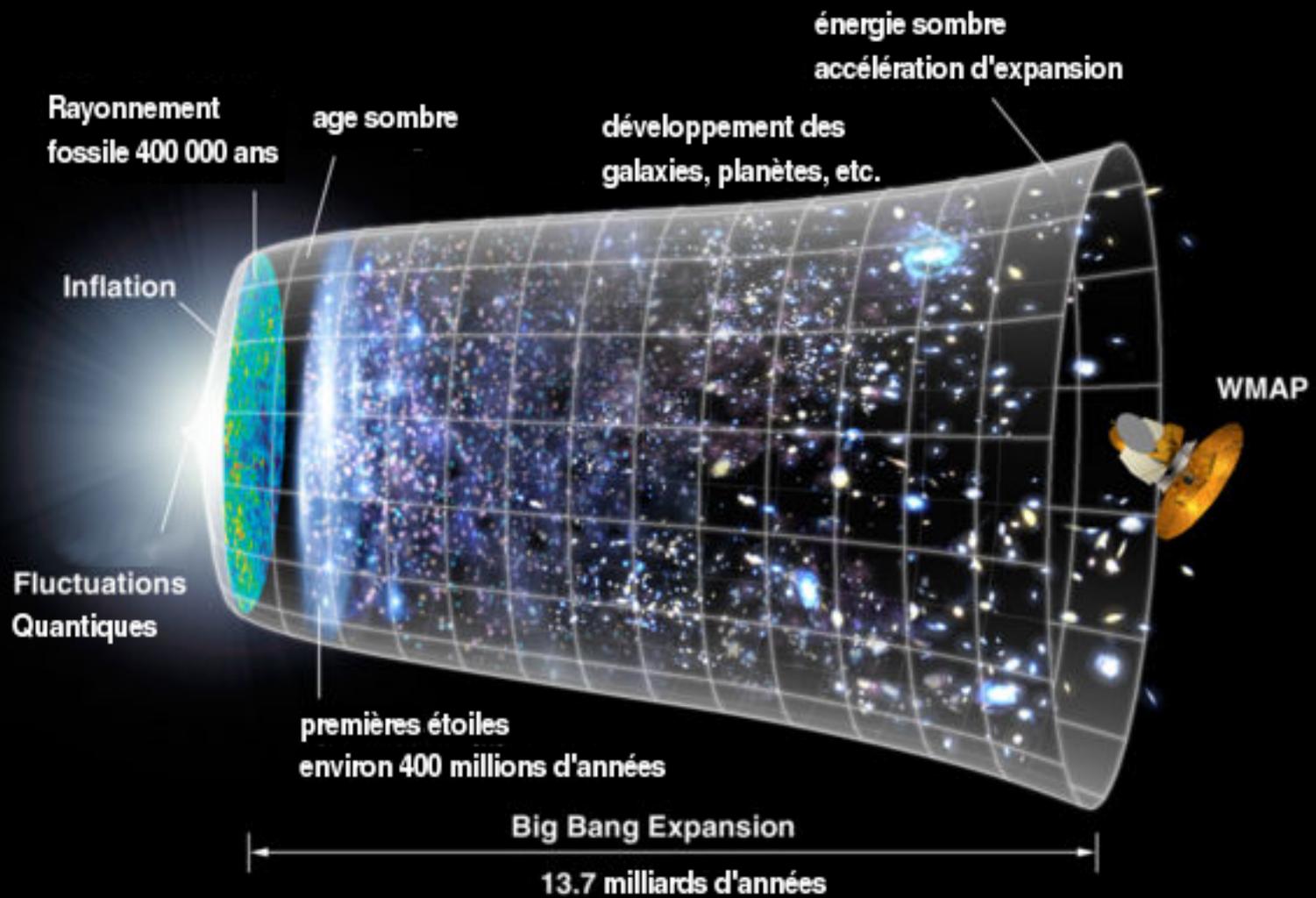
Cosmological Physics, Peacock, CUP, 1999

Gravitational Lenses, Schneider, Ehlers, Falco, Springer 1992

Living Reviews,, Wambsganss, 1998

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-1998-12/>

Références à suivre...



Prolégomènes

Le modèle de concordance:

Age : $t \sim 14$ Ma

Refroidissement: univers plus chaud dans le passé

Maintenant $T = 2.73$ K CBR (3000K à $z=1000$ Comb.)

Universe plat: $\Omega_k = 1$

Budget énergétique aujourd'hui:

Energie sombre: $\Omega_{\Lambda} = 70\%$

Matière étrange: $\Omega_M h^2 = 28\%$

Matière normale (Baryons): $\Omega_B h^2 = 2\%$

Partie I: histoire et théorie

Les lentilles gravitationnelles trouvent une interprétation naturelle dans la théorie de la Relativité Générale, mais sont aussi interprétables dans d'autres théories de la gravitation:

Chwolson (1924), Link (1936), Einstein (1936)

Zwicky (1937), Refsdal (1964, † 2009)

Partie I: histoire et théorie

La physique de la cosmologie moderne s'appuie sur le fait que l'espace-temps obéit localement à la relativité restreinte et globalement à la relativité générale.

Partie I: histoire et théorie

Relativité restreinte:

Les lois de la physique sont les mêmes quelque soit la vitesse (en particulier c constante)

-> Le temps, les distances varient selon une transformation non-linéaire.

Partie I: histoire et théorie

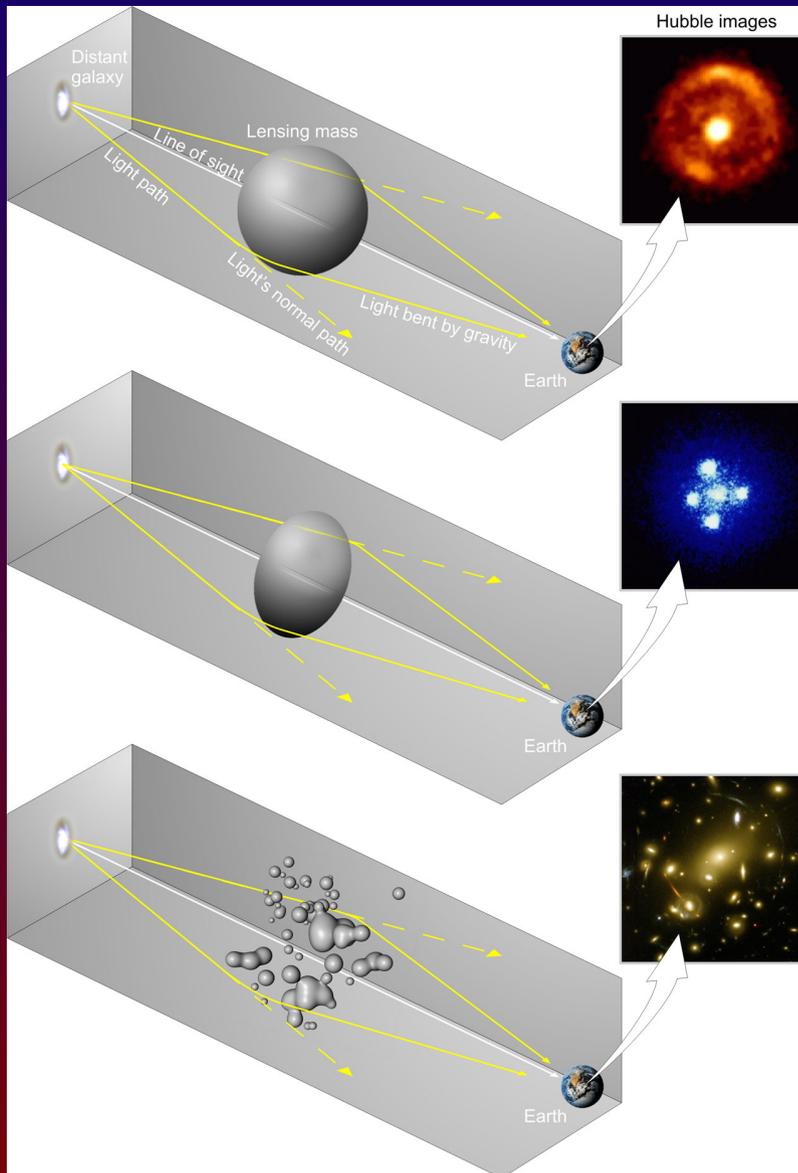
Relativité générale:

les lois de la physique sont invariantes aussi quand on est en chute libre

-> la gravitation est la manifestation physique d'un espace-temps courbe

Théorie métrique, les corps libres se déplacent selon le court chemin.

Partie I: histoire et théorie



La déformation de l'espace-temps dépend de la masse locale

-> On peut donc traduire une déformation géométrique en masse.

Partie I: histoire et théorie

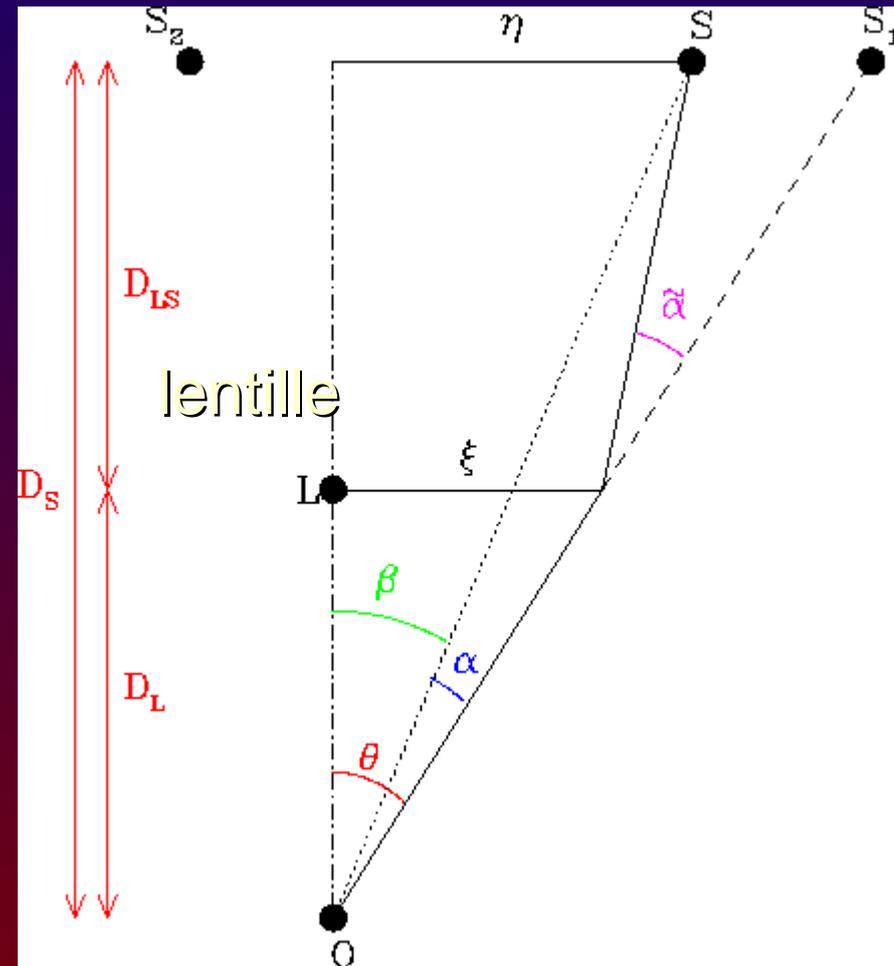
Equation de base des lentilles (minces!):

$$\beta = \theta - D_{LS} / D_S \alpha$$

En pratique: on ne connait que θ ,
et parfois D_{LS} et D_S

$$\Theta_E^2 = M / (10^{11.09} M_\odot) D_{LS} / D_L D_S [\text{Gpc}] \text{ asec}^2$$

1-2 arsec pour gal.



Nous

Partie I: histoire et théorie

Equation de base des lentilles (minces!):

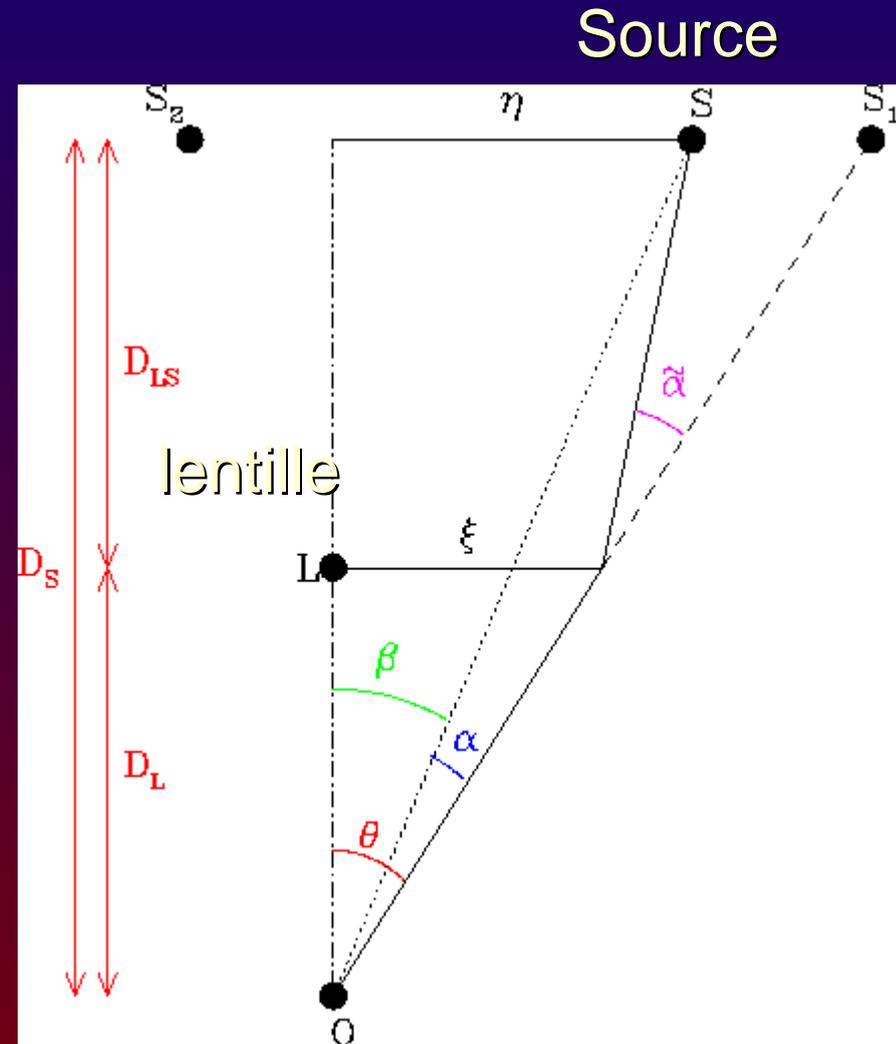
$$\beta = \theta - D_{LS} / D_S \alpha$$

En pratique: on ne connait que θ ,

et parfois D_{LS} et D_S

$$\Theta_E^2 = M / (10^{11.09} M_\odot) D_{LS} / D_L D_S [\text{Gpc}] \text{ asec}^2$$

1-2 arsec pour gal.



Nous

Partie I: histoire et théorie

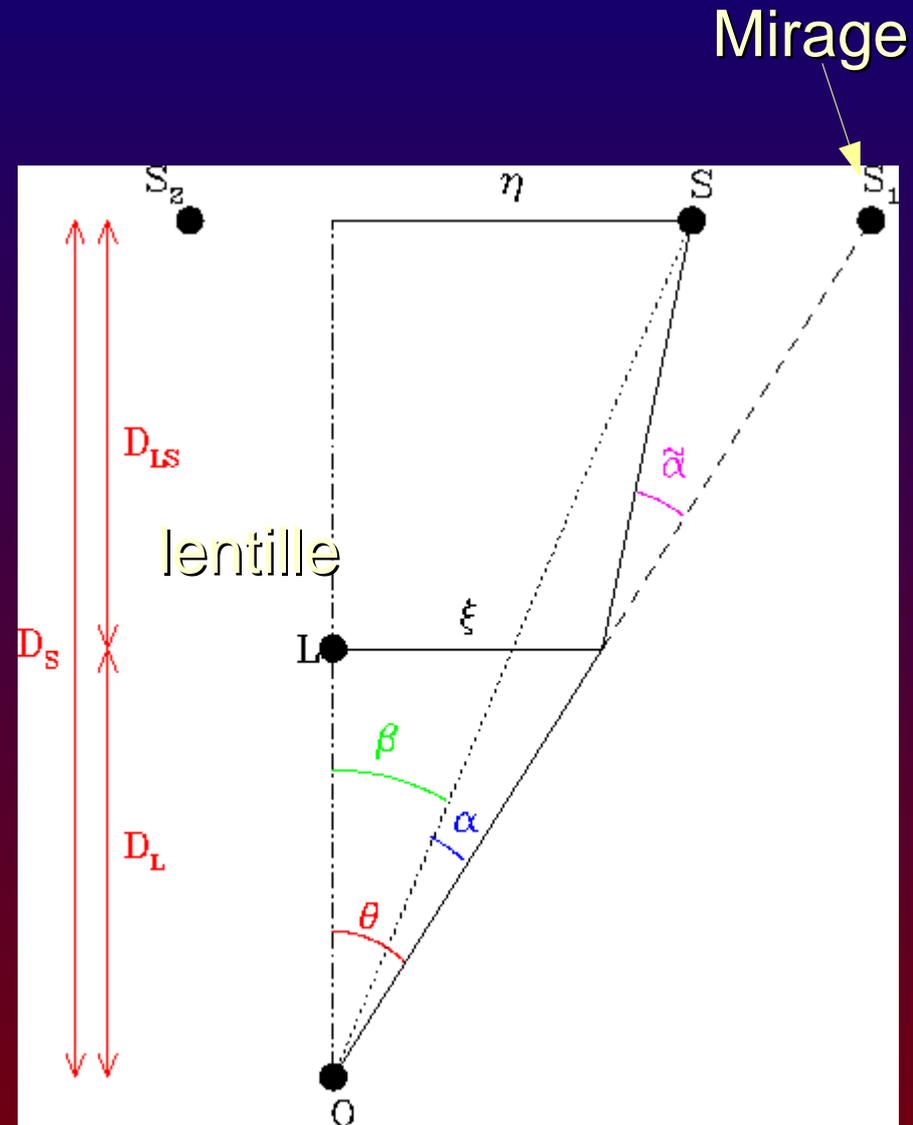
Equation de base des lentilles (minces!):

$$\beta = \theta - D_{LS} / D_S \alpha$$

En pratique: on ne connait que θ ,
et parfois D_{LS} et D_S

$$\Theta_E^2 = M / (10^{11.09} M_\odot) D_{LS} / D_L D_S [\text{Gpc}] \text{ asec}^2$$

1-2 arsec pour gal.



Nous

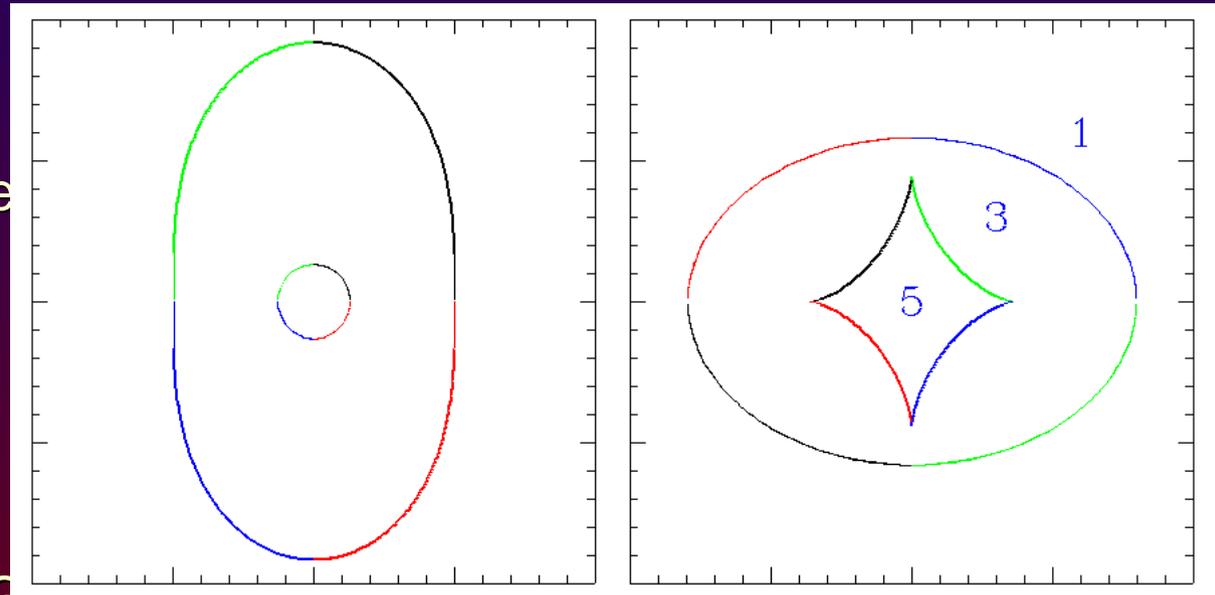
Partie I: histoire et théorie

Equation de base des lentilles (minces!):

$$\beta = \theta - D_{LS} / D_S \alpha$$

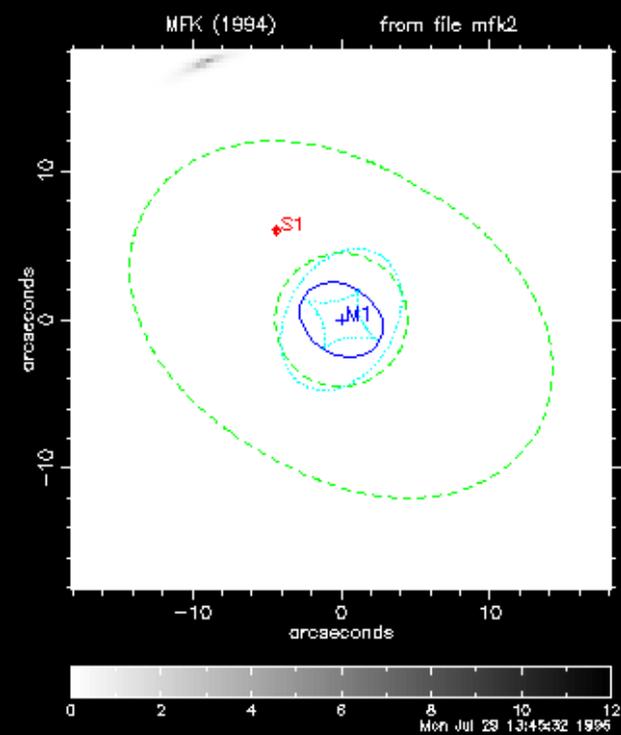
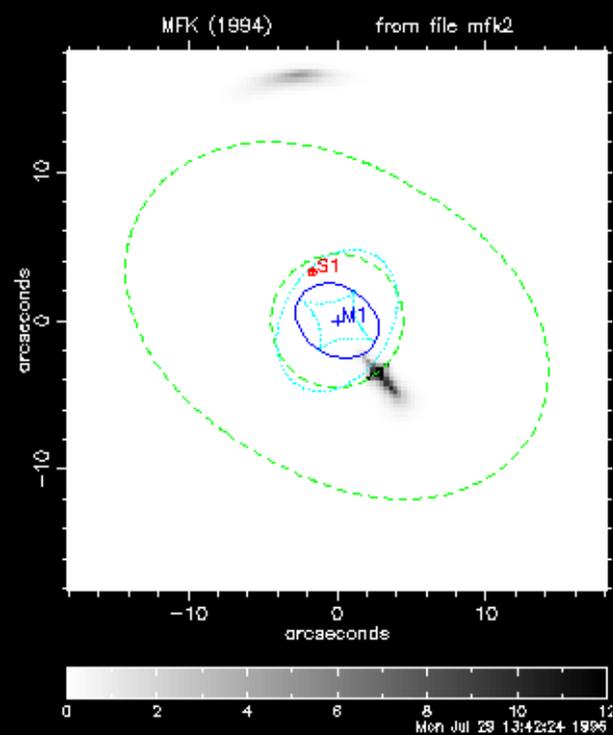
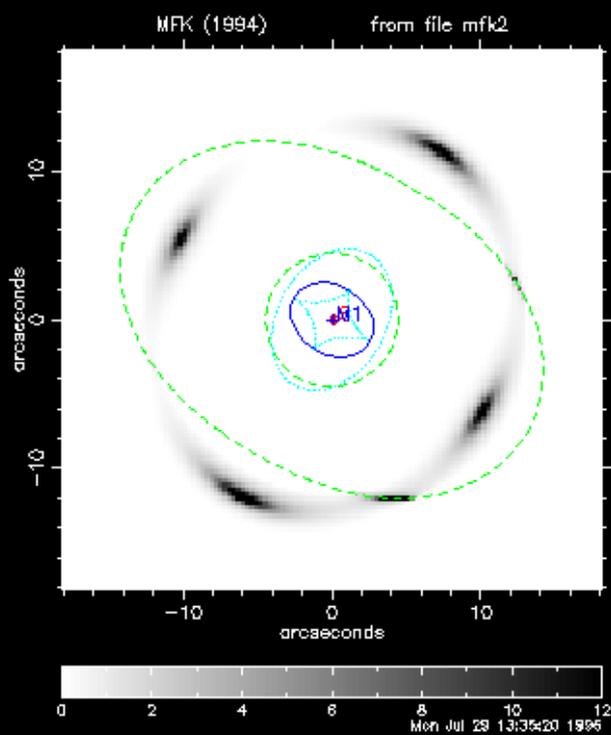
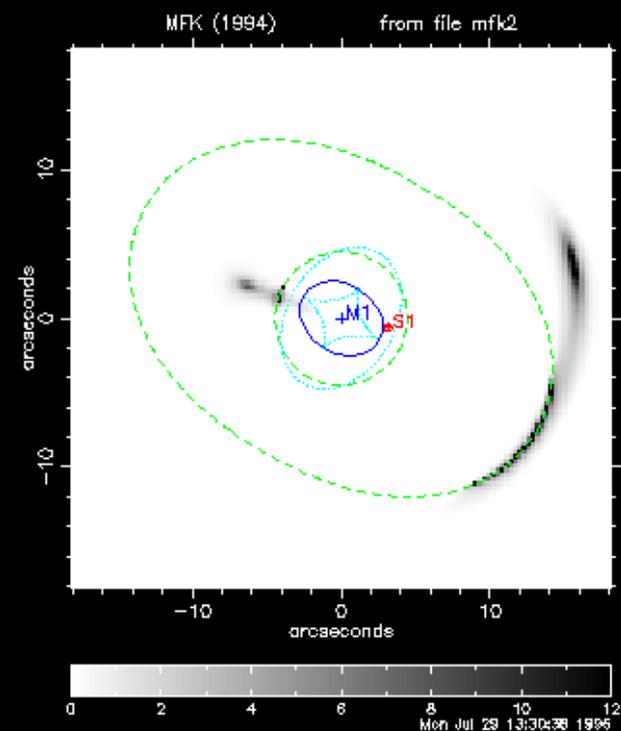
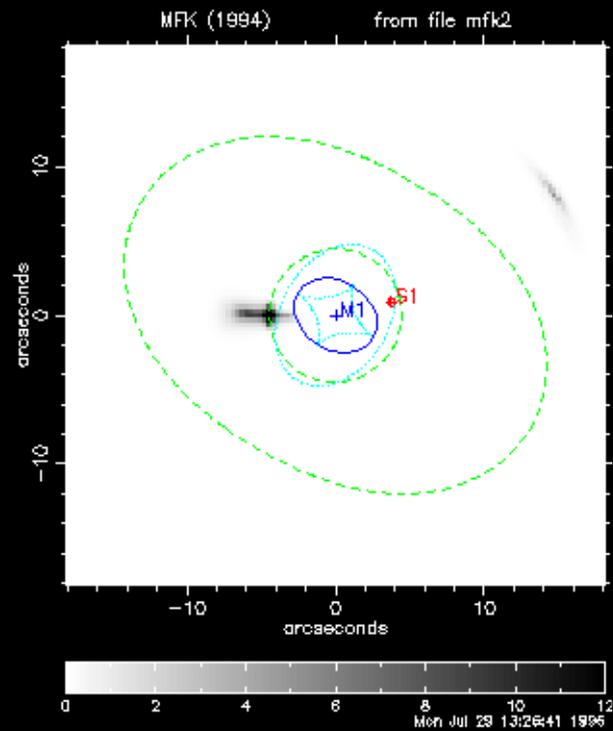
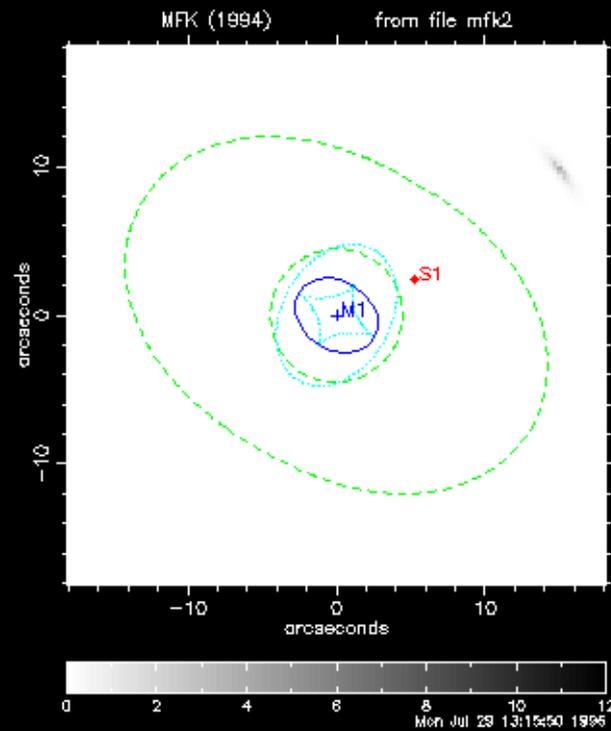
En pratique: on ne connaît que

et parfois D_{LS} et D_S



$$\Theta_E^2 = M / (10^{11.09} M_\odot) D_{LS} / D_L D_S [\text{Gpc}]^2 \text{ arcsec}^2$$

1-2 arcsec pour gal.

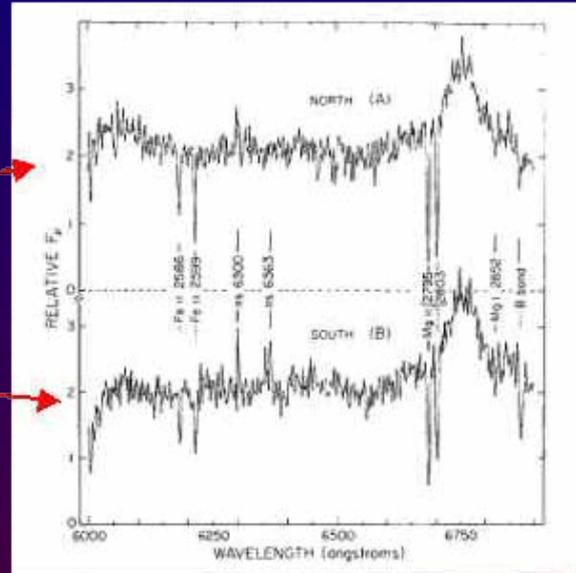
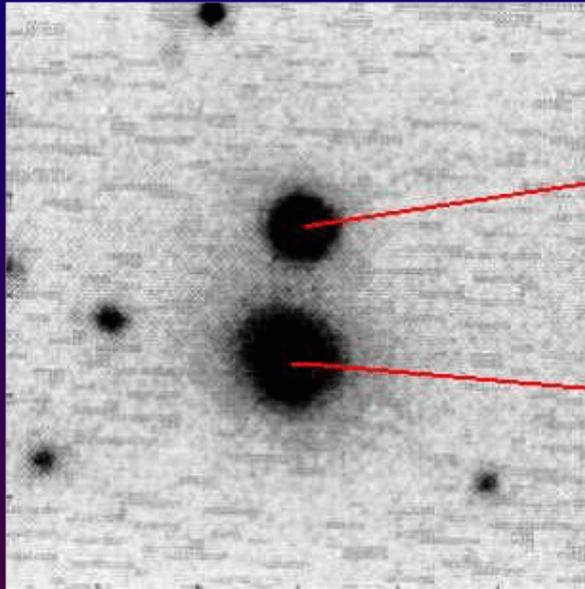


Partie I: histoire et théorie

Quelques propriétés importantes des mirages:

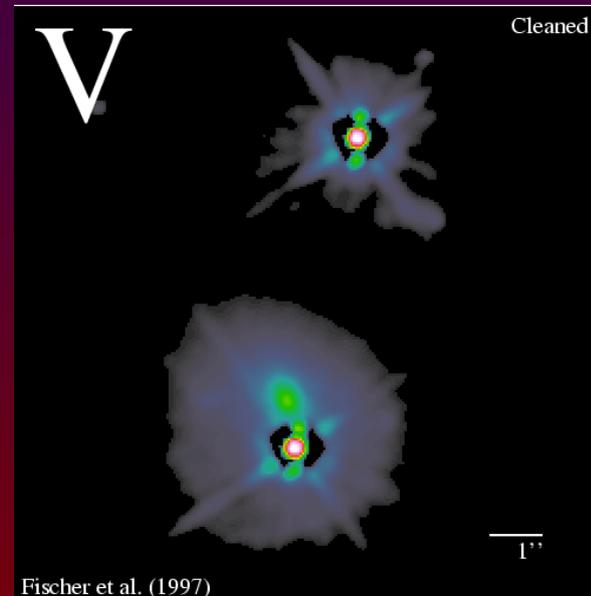
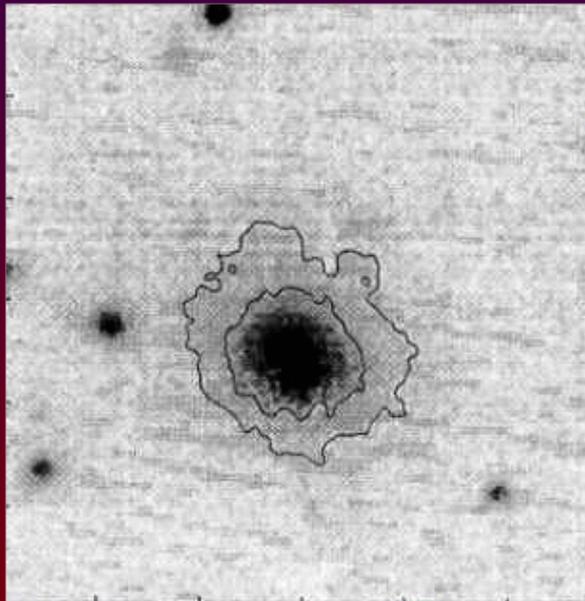
- déformation ne change pas la couleur de la source
- déformation conserve la brillance de surface de la source
- le nombre d'images et leur forme ne dépend que de la densité et de la géométrie de la lentille et de son environnement
- les géodésiques des différentes images n'ont pas la même longueur -> délai temporels

Partie II: observations et applications



Découverte
de J. Walsh
et al. (1979)

Quasars
binaires et
multiples

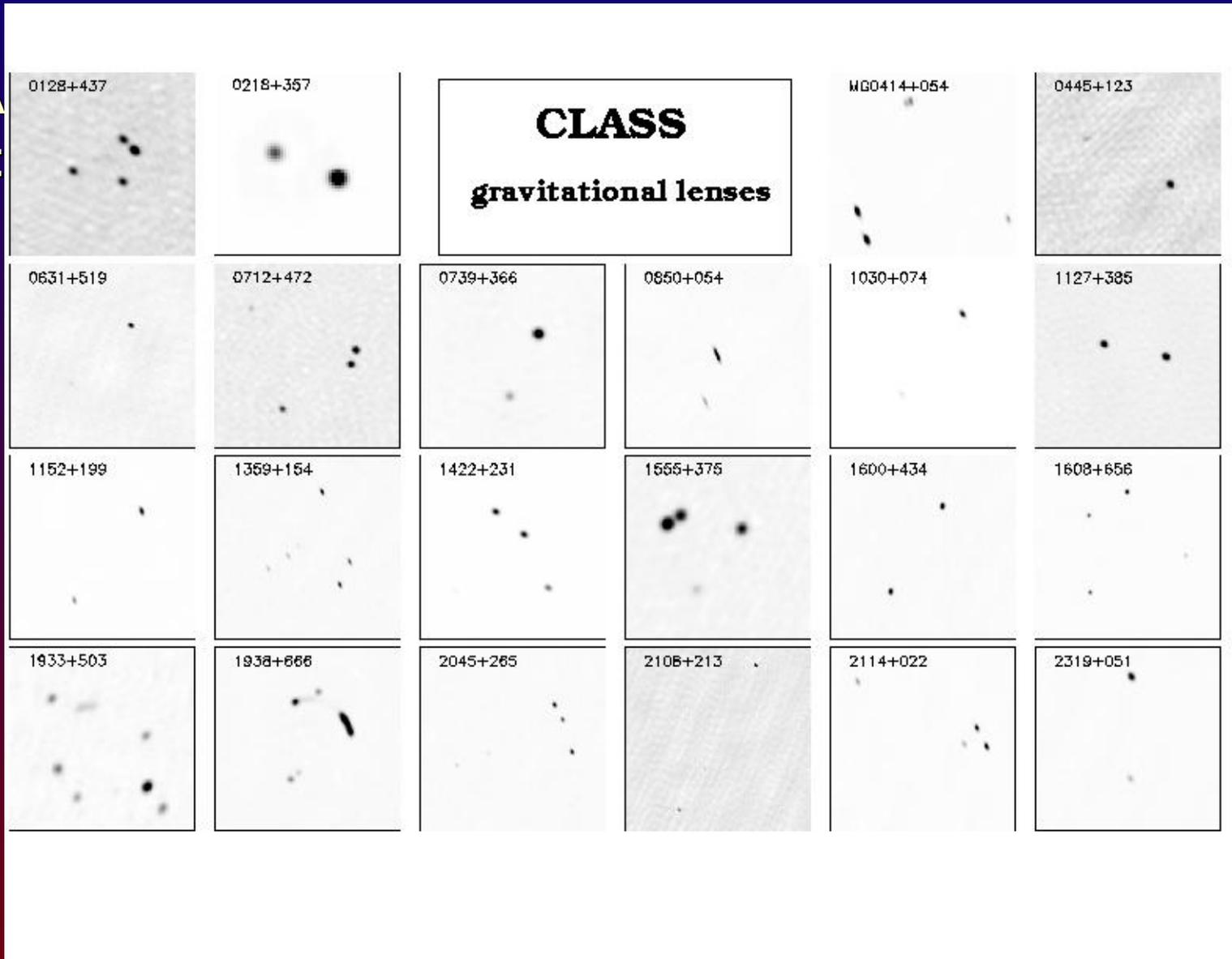


Partie II: observations et applications

CLASS: sondage radio, 22 quasars multiples,
<http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/class/class.html>

Partie II: observations et applications

CLA
http:

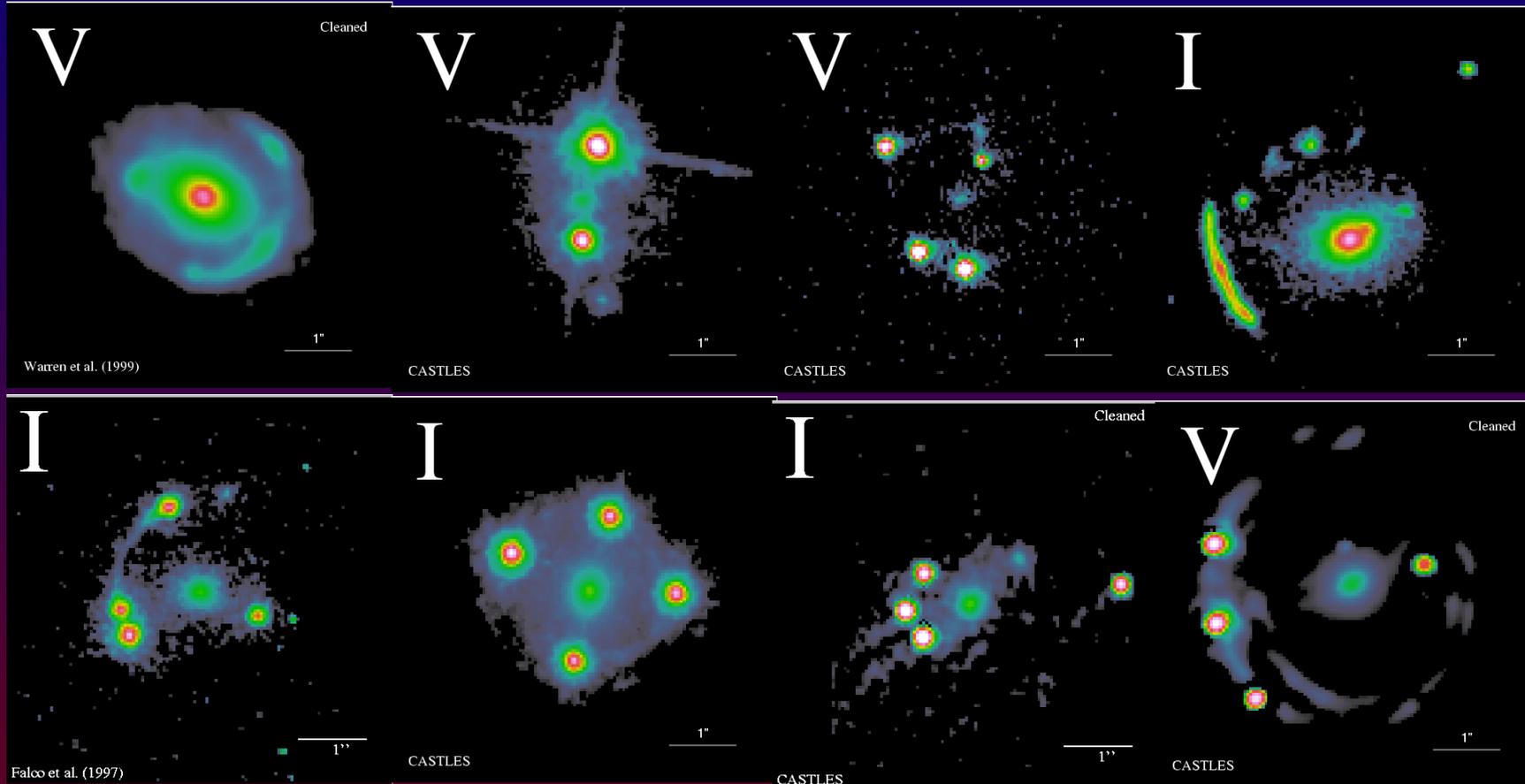


Partie II: observations et applications

CLASS: sondage radio, 22 quasars multiples,
<http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/class/class.html>

CASTLE: 70 quasars multiples
<http://www.cfa.harvard.edu/castles/>

Partie II: observations et applications



Partie II: observations et applications

CLASS: sondage radio, 22 quasars multiples,
<http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/class/class.html>

CASTLE: 70 quasars multiples
<http://www.cfa.harvard.edu/castles/>

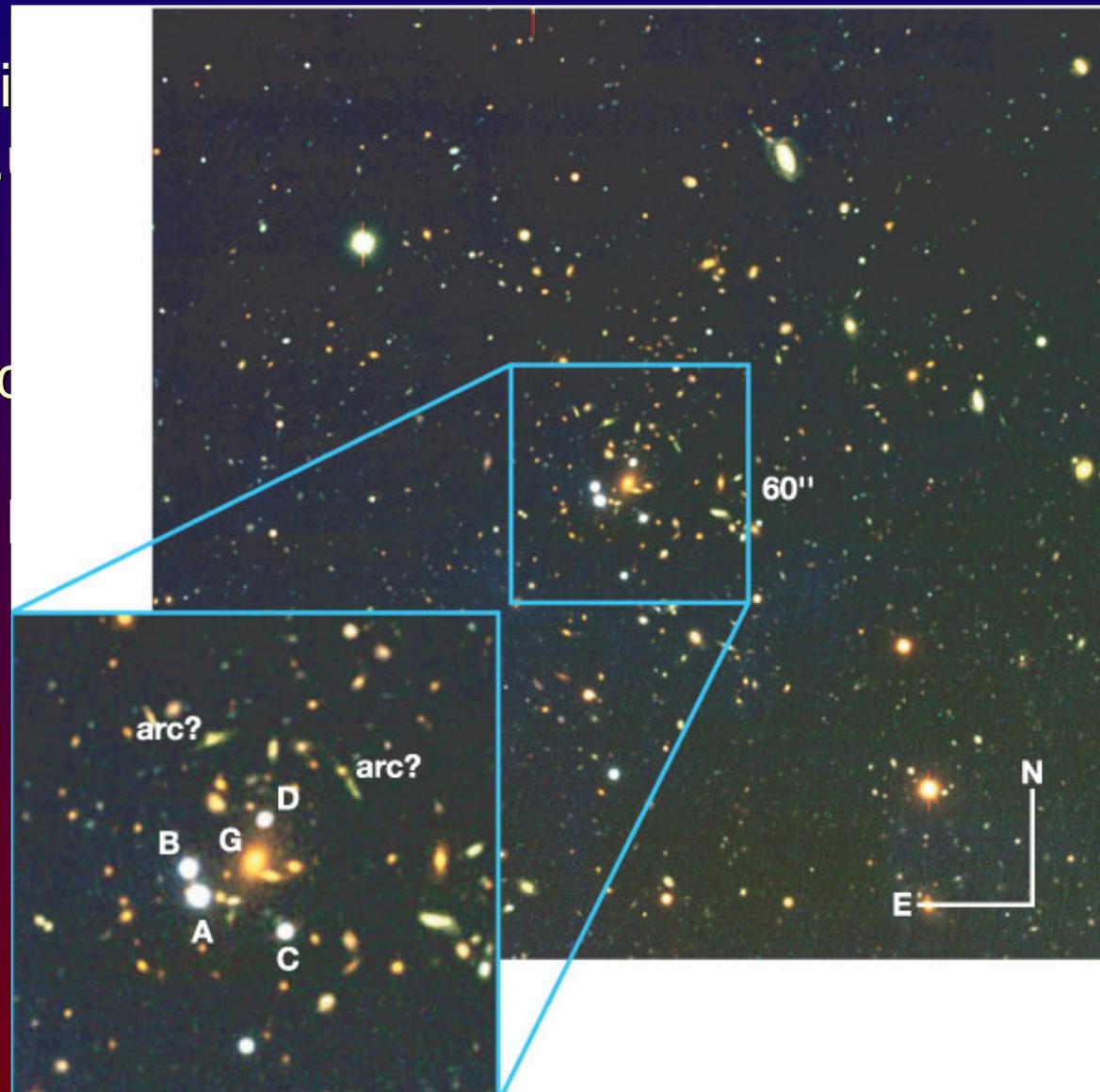
SDSS: quasars avec large séparation

Partie II: observations et applications

CLASS: sondage radi
<http://www.jb.man.ac.uk>

CASTLE: 70 quasars
<http://www.cfa.harvard.edu>

SDSS: quasars avec



Partie II: observations et applications

CLASS: sondage radio, 22 quasars multiples,
<http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/class/class.html>

CASTLE: 70 quasars multiples
<http://www.cfa.harvard.edu/castles/>

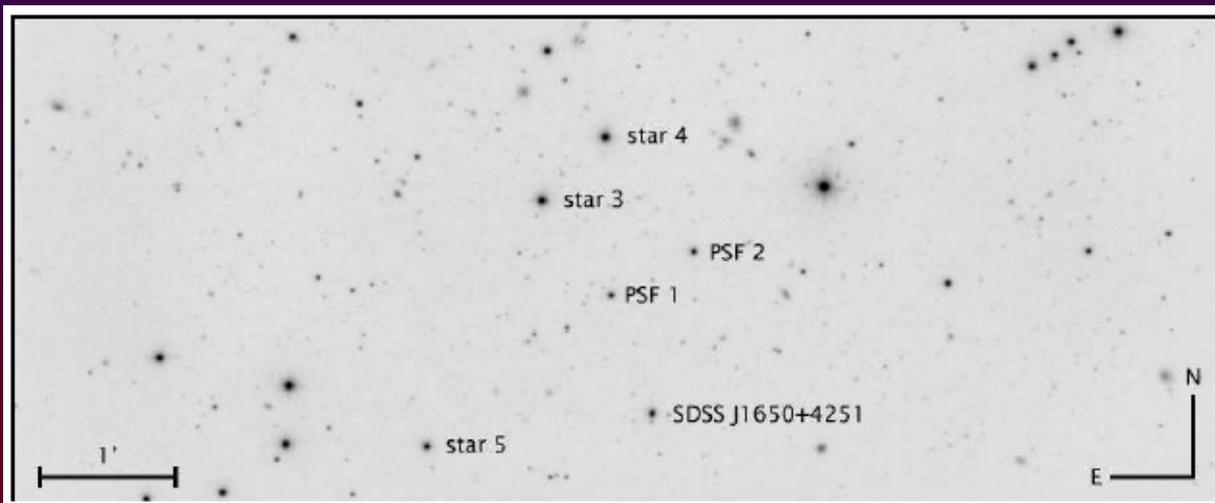
SDSS: quasars avec large séparation

Partie II: observations et applications

Les quasars permettent de calculer la constante de Hubble.

Programme: COSMOGRAIL

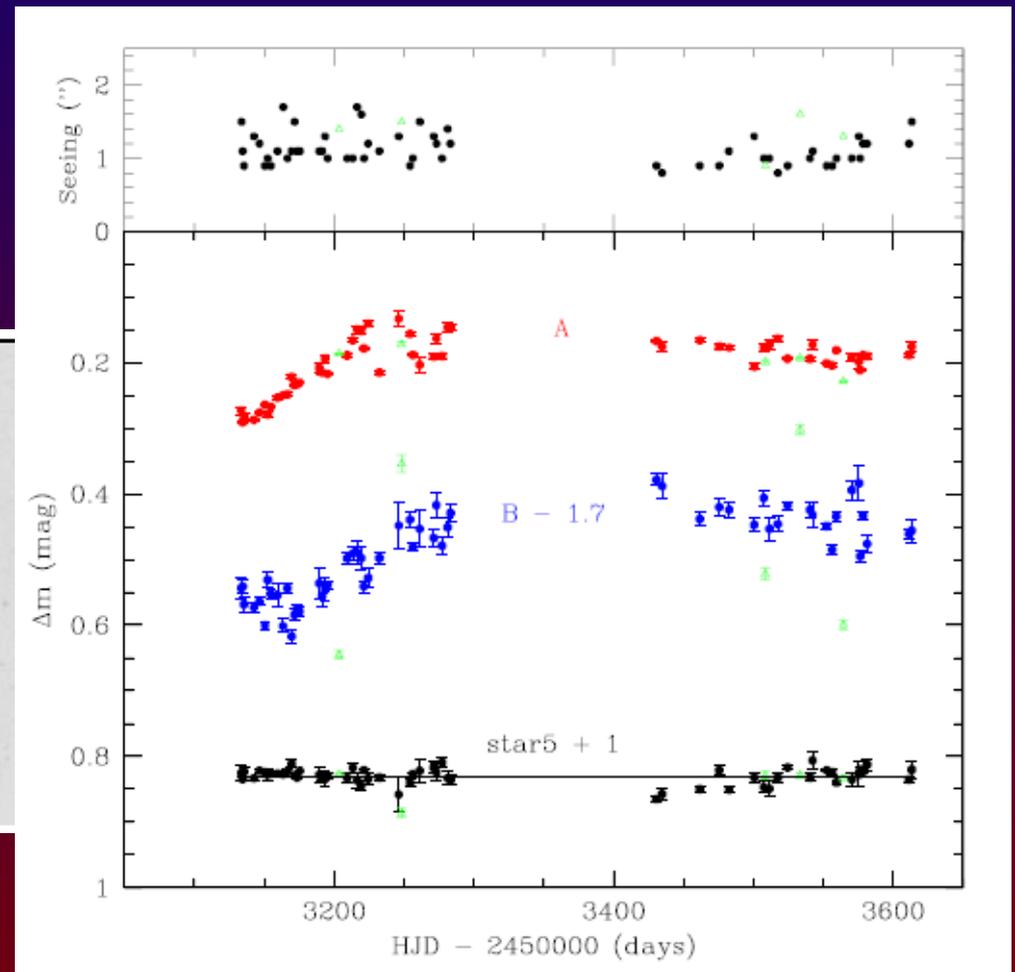
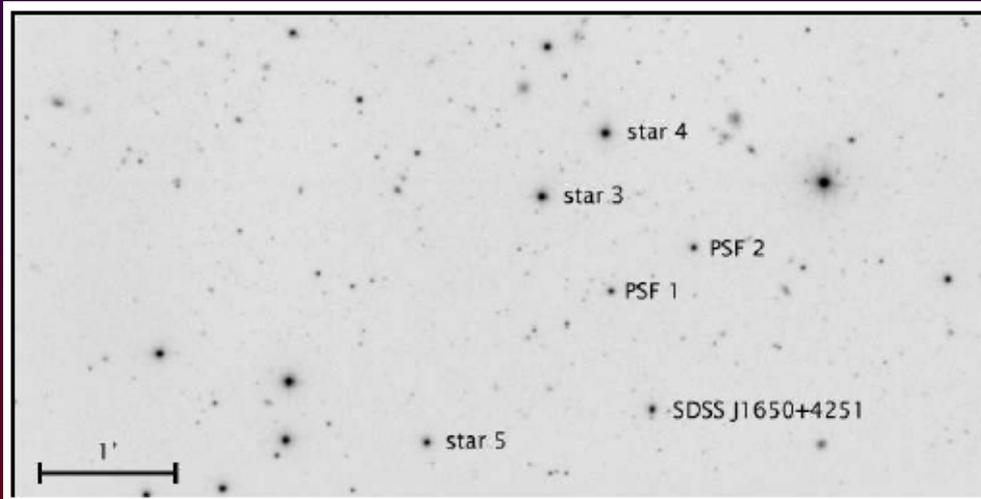
<http://www.cosmograil.org/>



Partie II: observations et applications

Les quasars permettent de calculer la constante de Hubble.

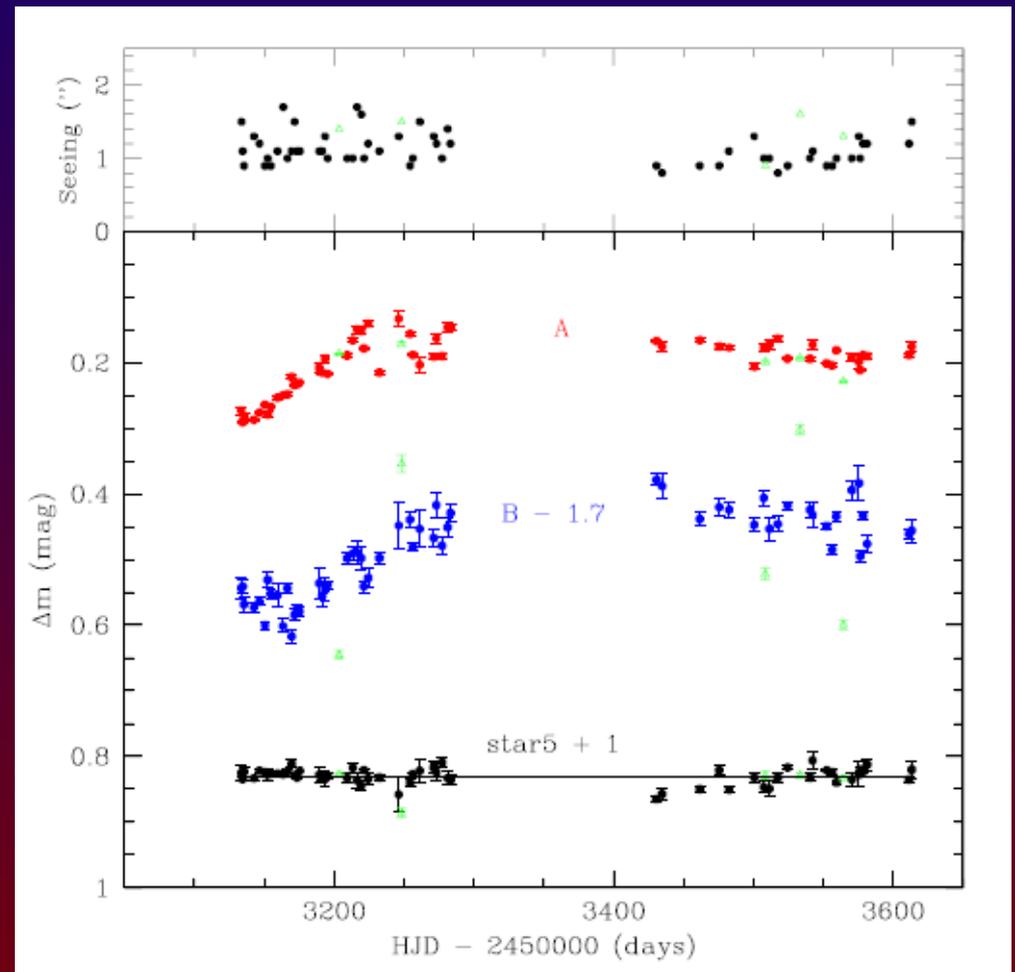
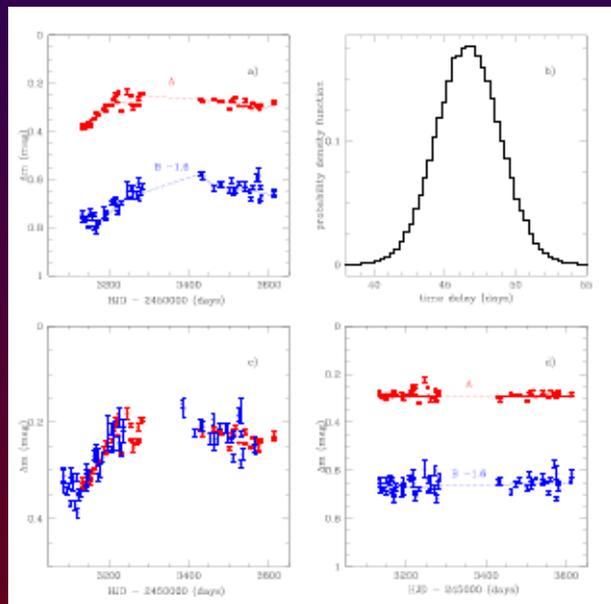
Programme: COSMOGRAIL
<http://www.cosmograil.org/>



Partie II: observations et applications

Les quasars permettent de calculer la constante de Hubble.

Programme: COSMOGRAIL
<http://www.cosmograil.org/>



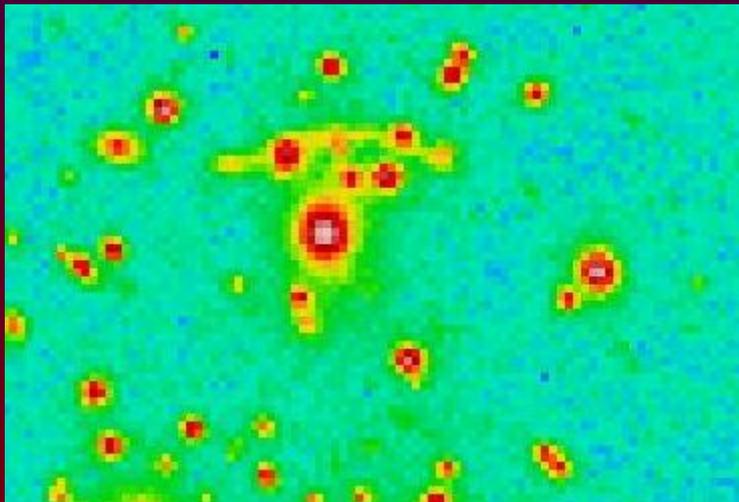
$t = 46.7 \pm 2.2$ jours
 $H_0 = 50-80$ km/s/Mpc

Partie II: observations et applications

Les quasars ne permettent pas de dériver beaucoup d'informations sur les lentilles.

En 1987: nouvelle révolution détection des arcs gravitationnels géants (Astronomes toulousains!)

Abell 370

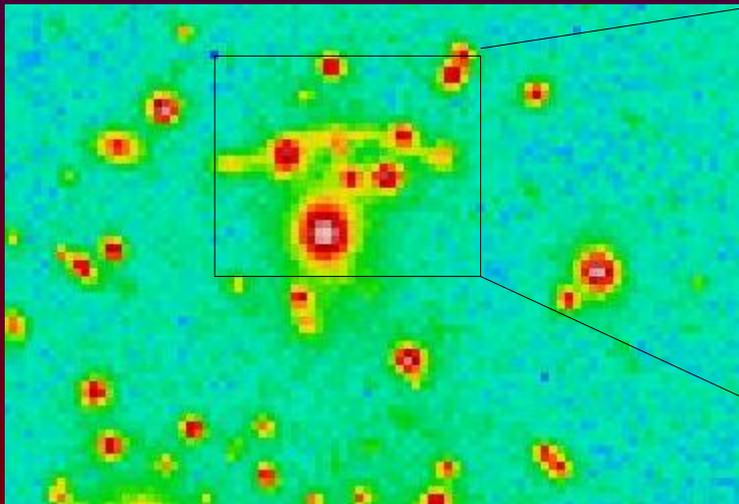


Partie II: observations et applications

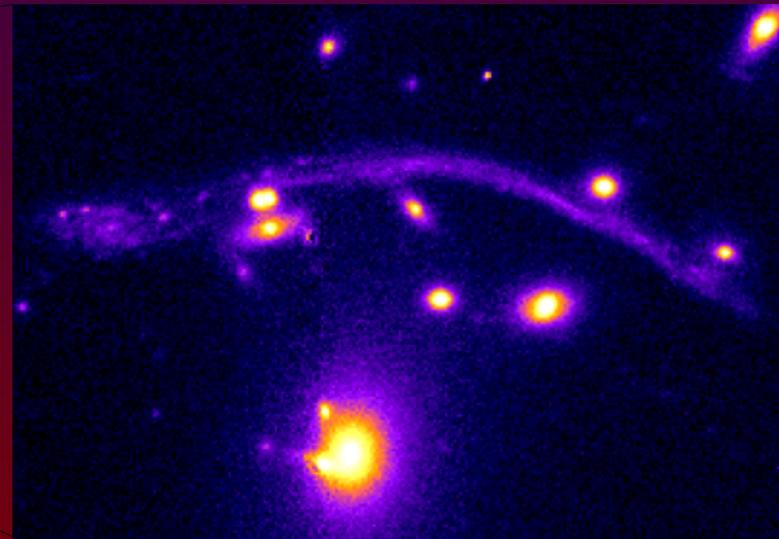
Les quasars ne permettent pas de dériver beaucoup d'informations sur les lentilles.

En 1987: nouvelle révolution détection des arcs gravitationnels géants (Astronomes toulousains!)

Abell 370



HST



Partie II: observations et applications

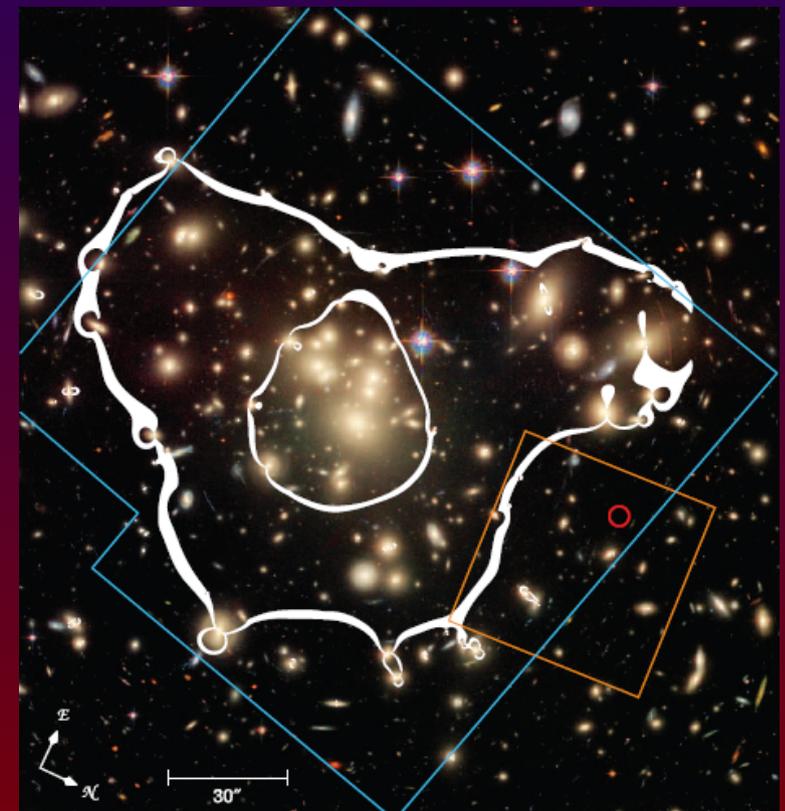
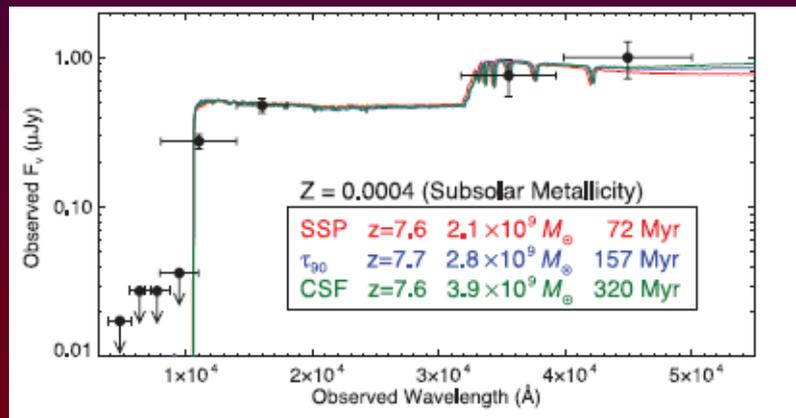
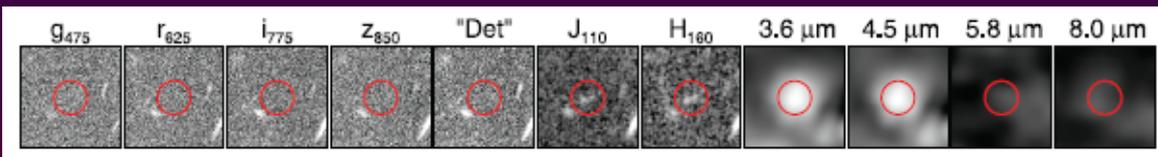
Les amas géants HST



Partie II: observations et applications

Les amas géants HST

- Les dizaines d'arcs permettent une analyse fine de la distribution de la masse totale dans les amas (Kneib)
- Effet télescope gravitationnel



Partie II: observations et applications

La plupart des lentilles ont été observées par hasard,
beaucoup d'applications ont besoin d'un grand échantillon
statistique

Années post 2000 -> Détections massives: SDSS CFHTLS

Projets SLACS, SL2S, SDSS

Partie II: observations et applications

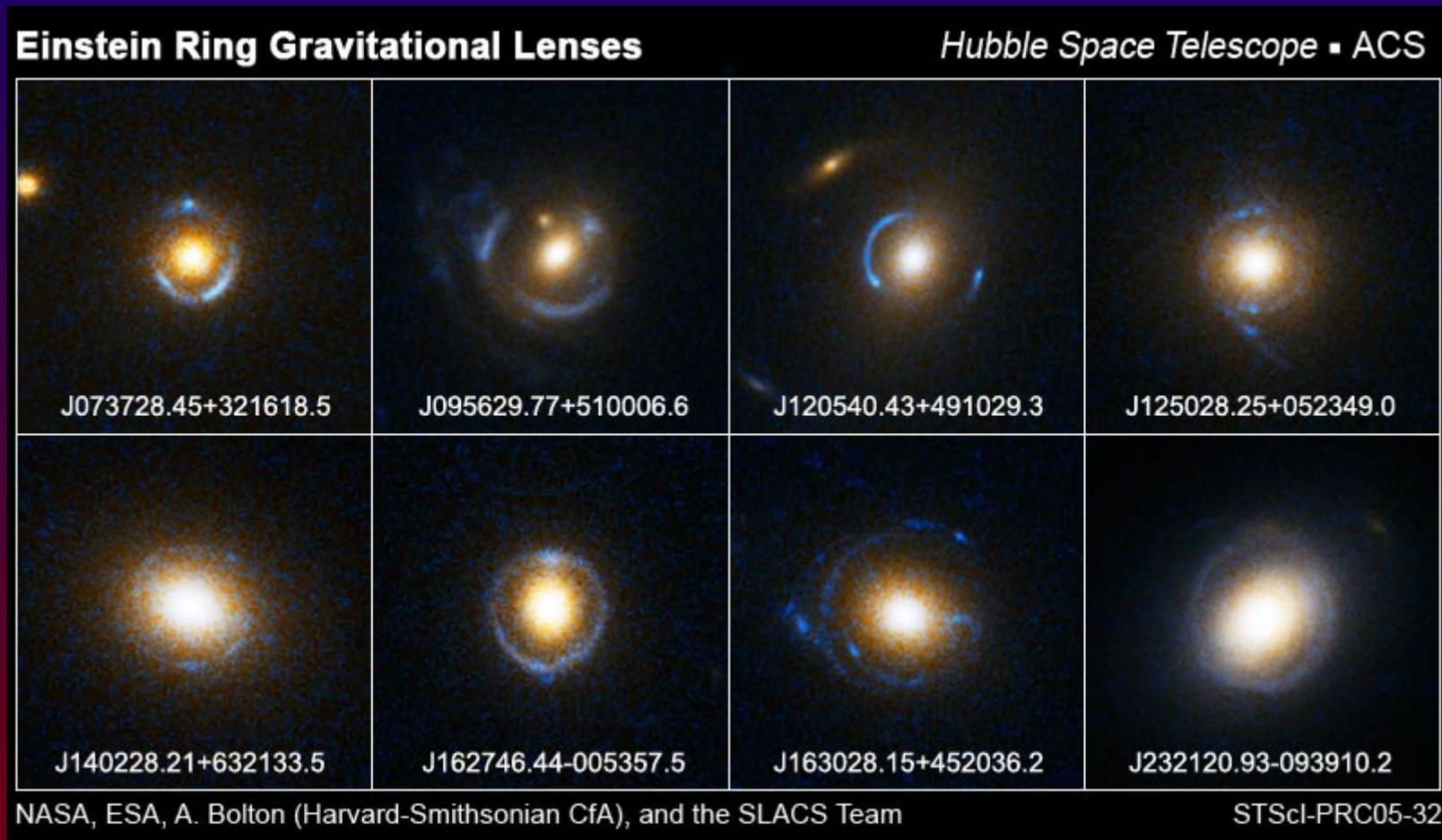
Les différentes échelles des lentilles

Prédictions de densité de lentilles (simulations numériques):

- lentilles galaxies = 10-100/deg carré
- lentilles groupes = 1-5/deg carré
- lentilles amas = 0.1-0.5/deg carré

Partie II: observations et applications

Les lentilles galaxies sont les plus nombreuses



Partie II: observations et applications

Les lentilles galaxies sont les plus nombreuses

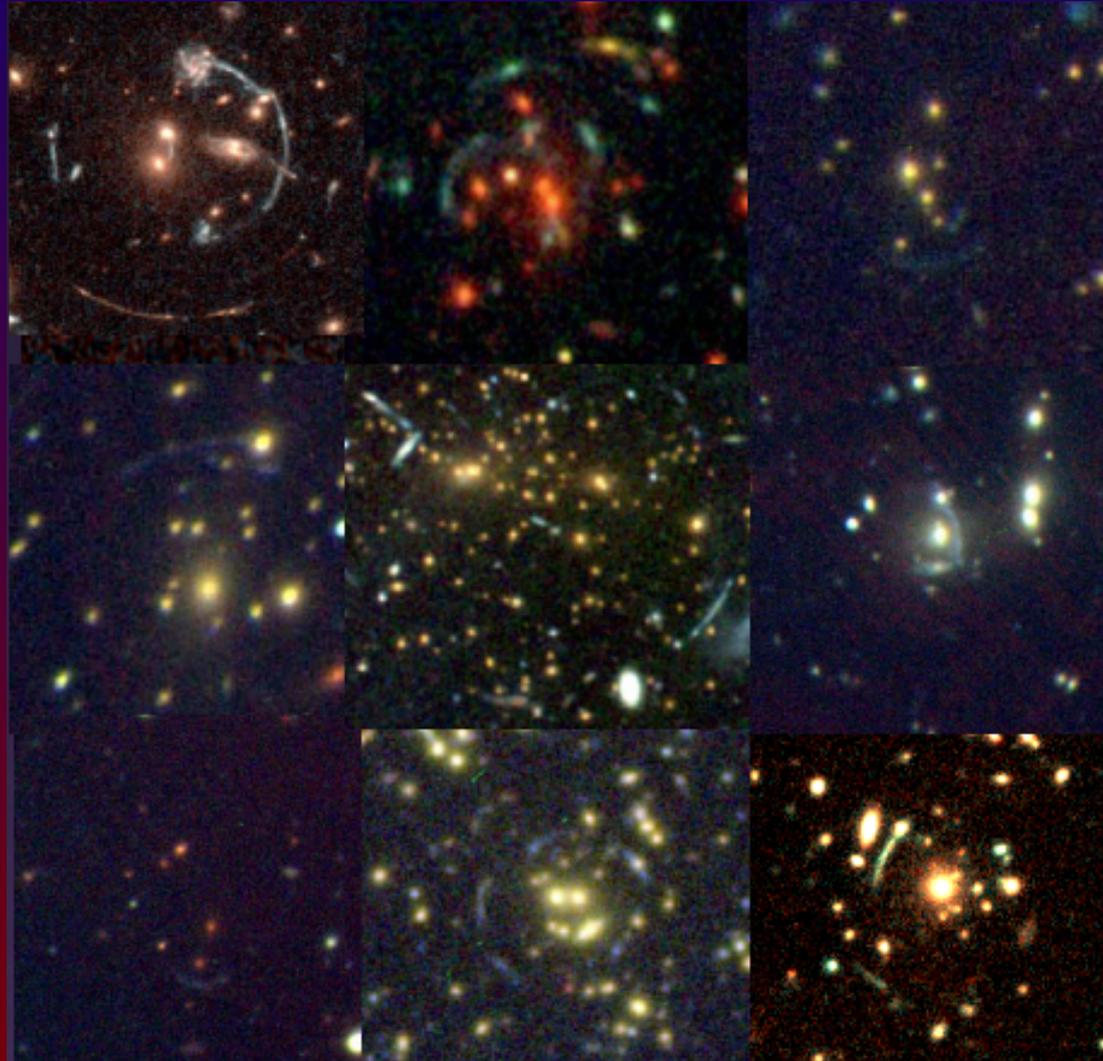
Les premières études confirment que les galaxies elliptiques massives contiennent 7-8 fois plus de masse totale que de masse visible sous forme d'un halo de matière sombre

Que les galaxies elliptiques lentilles ne sont pas différentes des autres galaxies.

Un échantillon de quelques milliers de lentilles permettrait de contraindre finalement les paramètres cosmologiques...
(travail en cours à l'IAP)

Partie II: observations et applications

Les lentilles amas (RCS2)

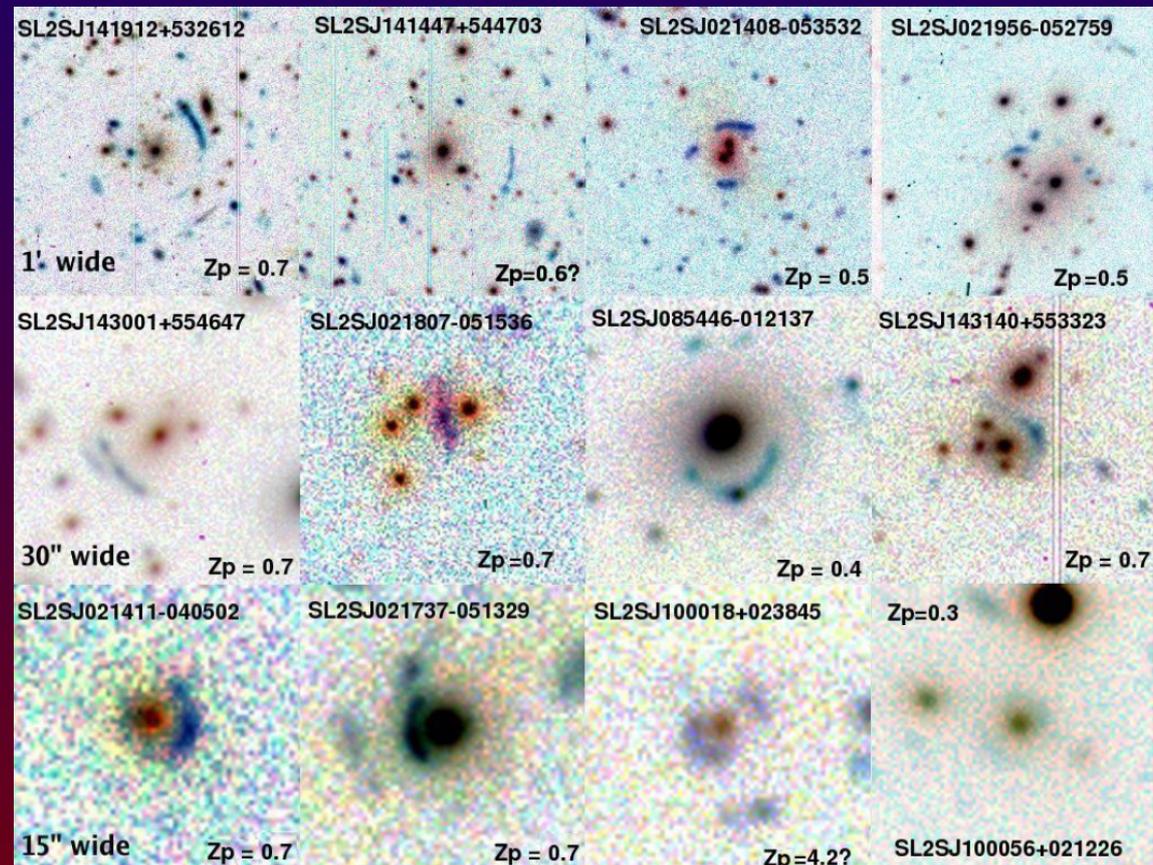


Partie II: observations et applications

Les lentilles de masse intermédiaire (entre galaxies et amas)

Le SL2S

Découverte des
Lentilles de groupes



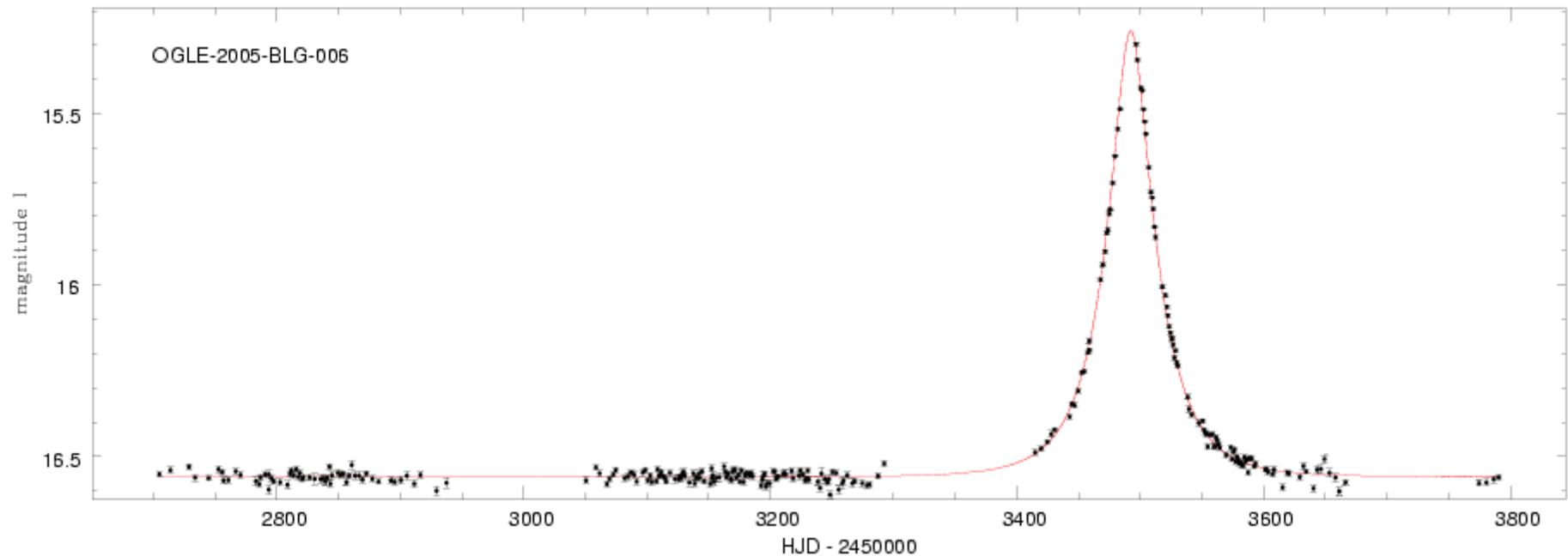
Partie II: observations et applications

Les groupes de galaxies sont les laboratoires où les effets locaux (formation des étoiles, rétroaction des noyaux actifs, effets dynamiques; pression, fusion de galaxies) ont la même amplitude que les effets à très grande échelle.

Leur étude recèle la clef de l'évolution des grandes structures.

Partie II: observations et applications

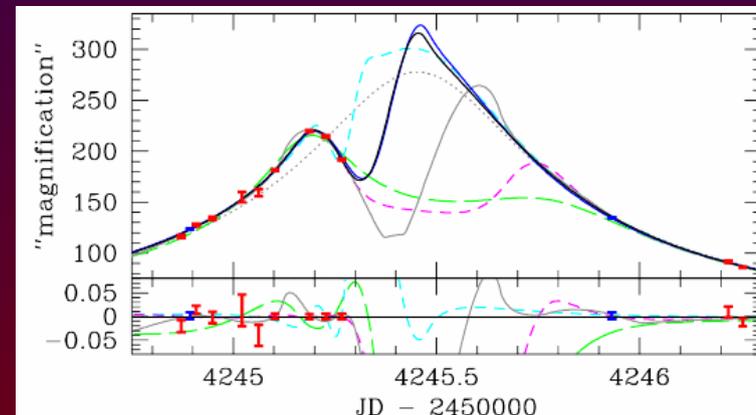
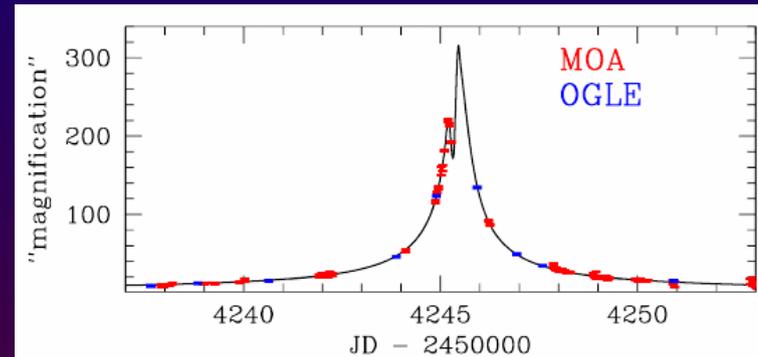
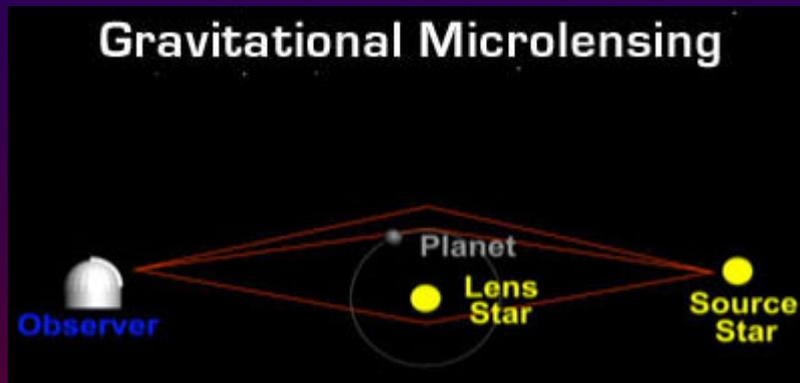
L'effet de lentille à l'échelle microscopique: microlentilles



Projets MACHOS, EROS, OGLE: étude de la matière sombre dans les galaxies sous forme d'objets compacts
Conclusion: la matière sombre ne peut pas prendre la forme d'objets compacts

Partie II: observations et applications

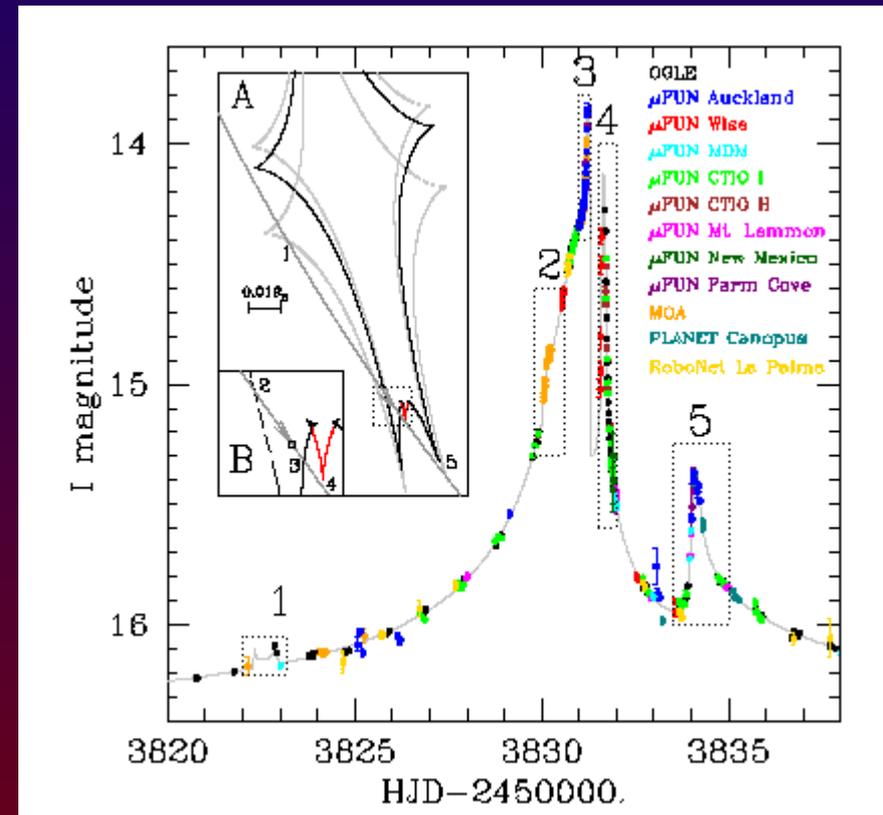
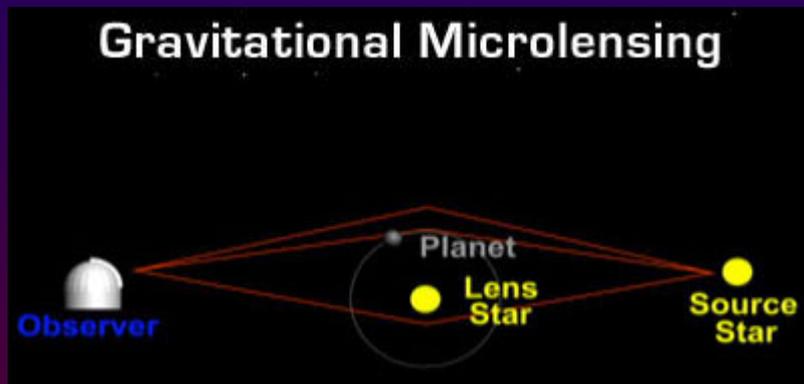
L'effet de lentille à l'échelle microscopique: microlentilles



OGLE: Détection de planète extra-solaires

Partie II: observations et applications

L'effet de lentille à l'échelle microscopique: microlentilles



OGLE: Détection de planète extra-solaires

Partie II: observations et applications

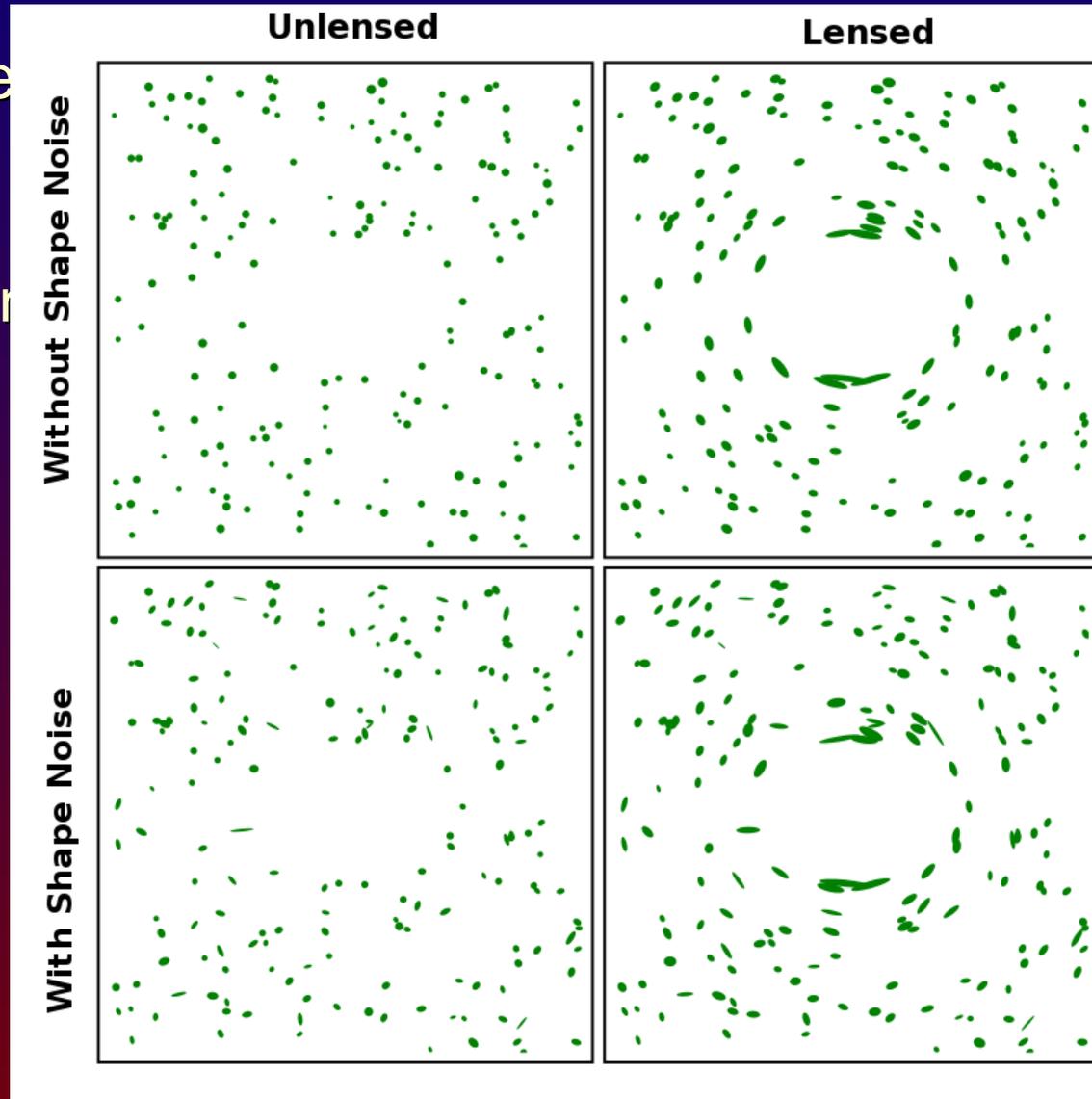
L'effet de lentille faible: environnement sous-critique

Les objets ne sont pas amplifiés, mais uniquement déformés

Partie II: observations et applications

L'effet de le

Les objets r

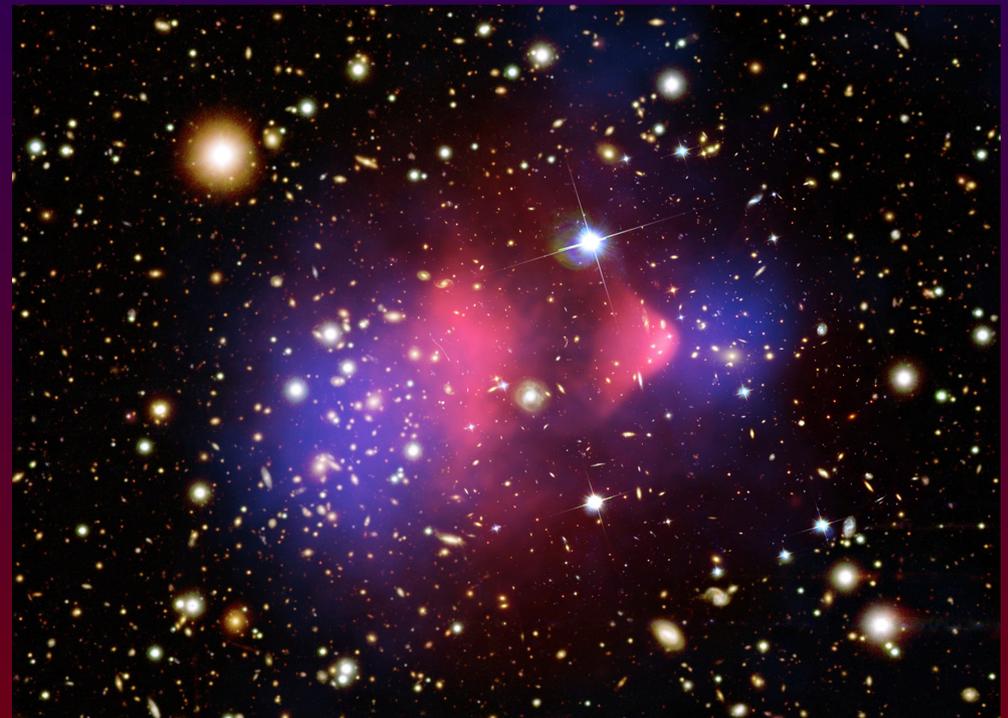
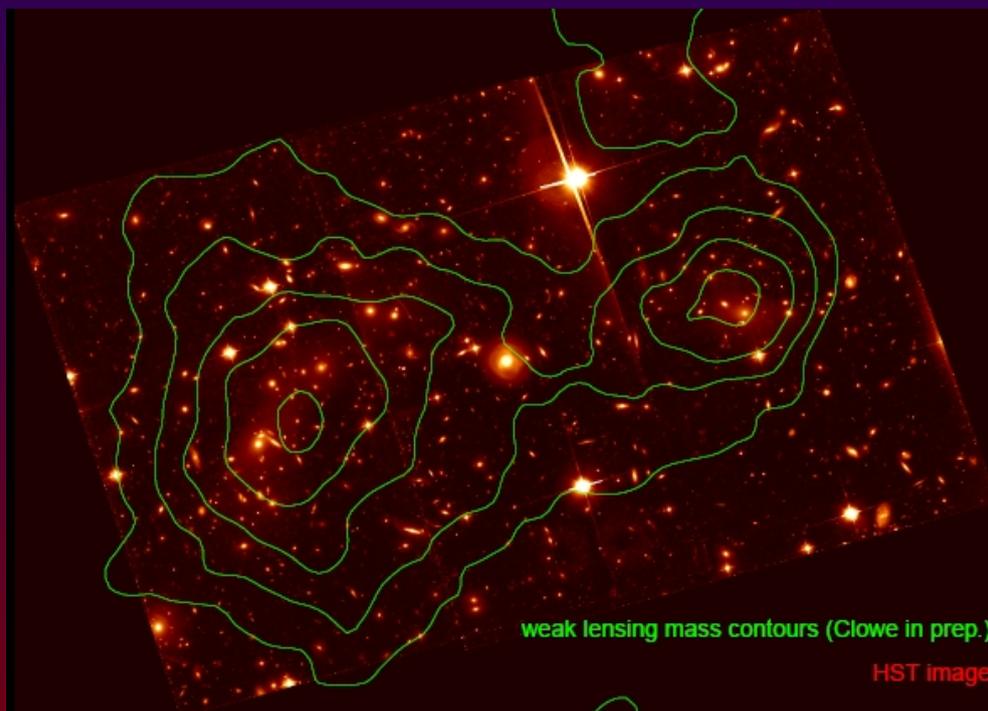


déformés

Partie II: observations et applications

L'effet de lentille faible: environnement sous-critique

Les objets ne sont pas amplifiés, mais uniquement déformés



Partie II: observations et applications

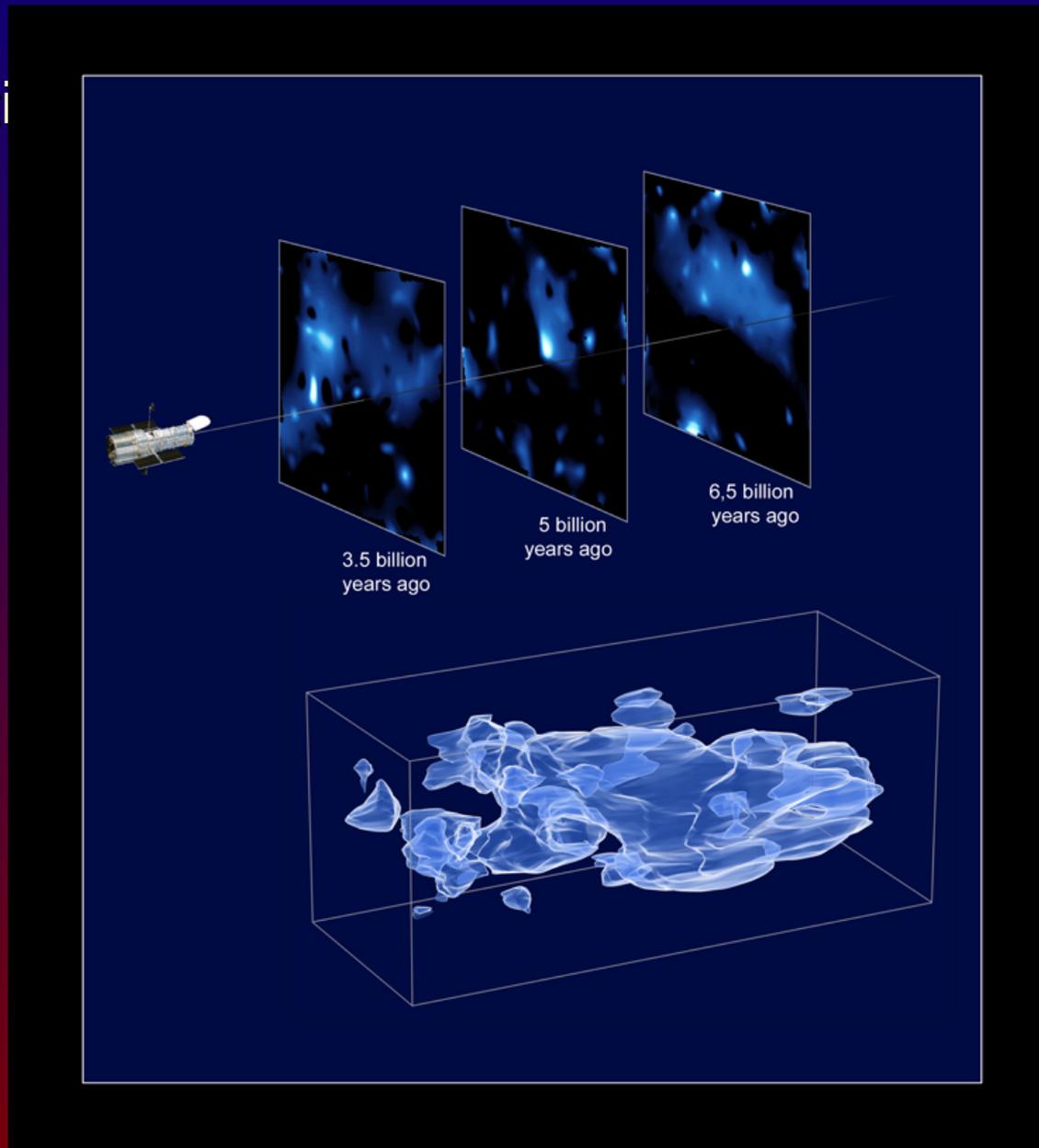
L'effet de lentille faible: environnement sous-critique

Tomographie de l'univers: projet COSMOS

Partie II: observations et applications

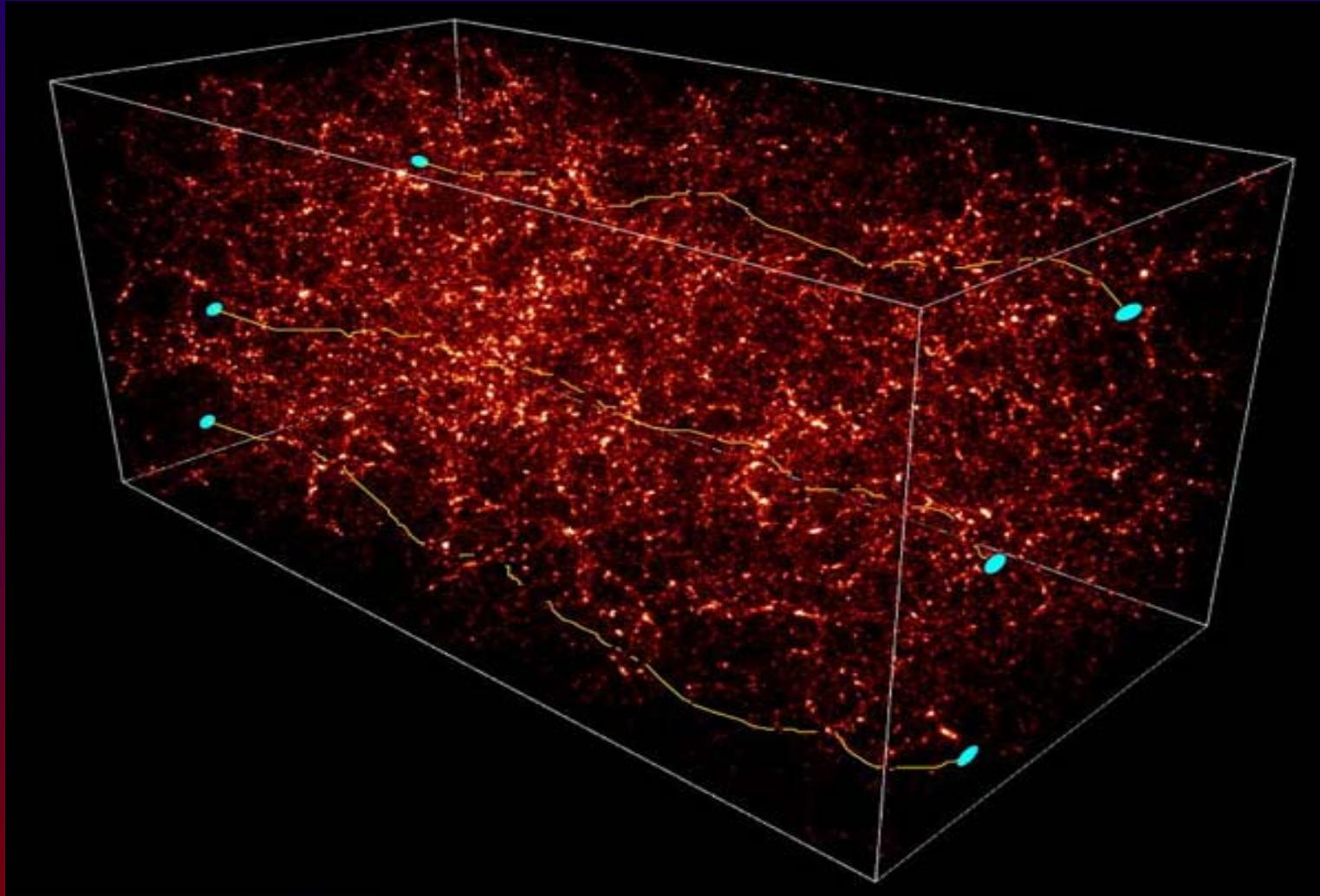
L'effet de lentille

Tomographie



Partie II: observations et applications

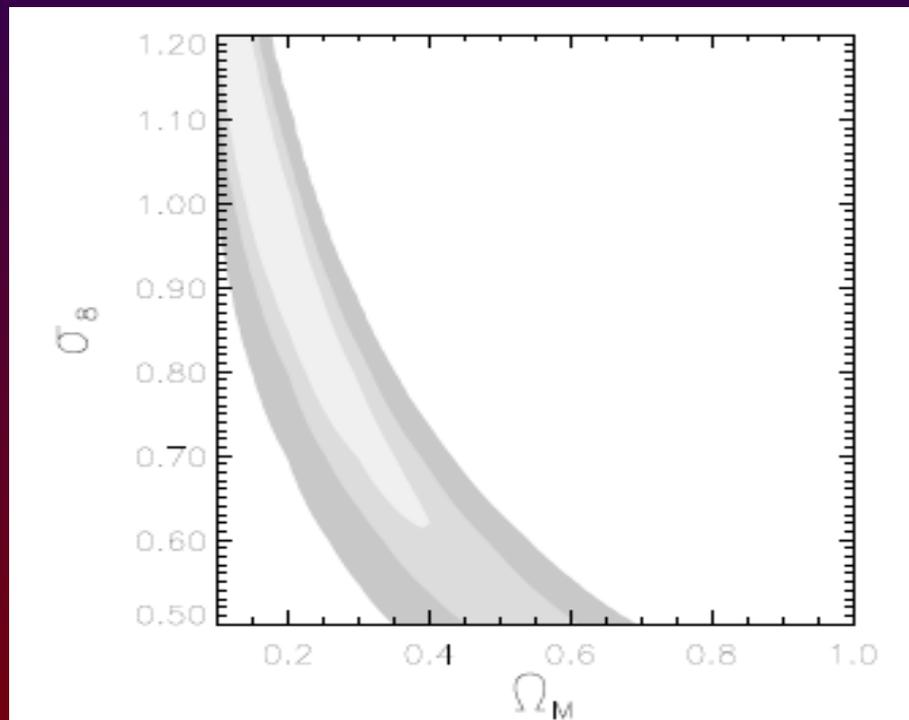
L'effet de lentille statistique: cisaillement cosmique



Partie II: observations et applications

L'effet de lentille statistique: cisaillement cosmique

Contraint les paramètres cosmologiques fondamentaux, notamment la densité des structures, la densité critique de l'univers, la constante cosmologique



Conclusion: le futur

L'étude des déformations gravitationnelles a un bel avenir

Grands projets à suivre:

Sol:

LSST: 8-m Large Synoptic Survey Telescope

http://www.lsst.org/lsst_home.shtml

Espace:

JDEM / EUCLID: <http://snap.lbl.gov/>