

Comment la matière agit sur la lumière : Lentilles gravitationnelles

- Historique
- La lumière tombe !
- l'effet de lentille gravitationnelle
- Applications:
 - lentilles fortes (images multiples, arcs, anneaux)
 - lentilles faibles (légères déformations, effet statistique)
 - micro lentilles (déformations inobservables, amplification)

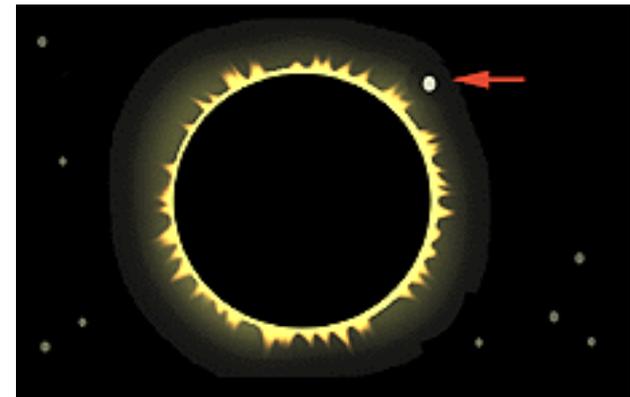
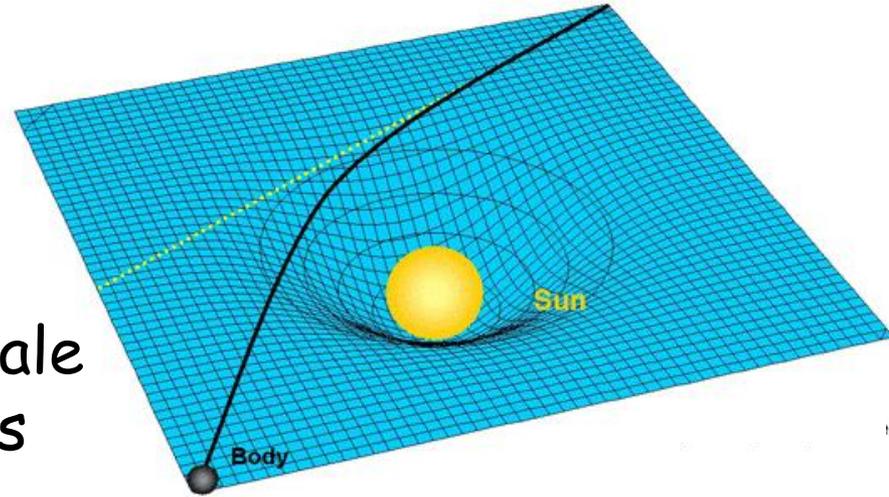
Jean-Marc Le Goff, SPP, CEA Saclay, jmlegoff@cea.fr

Historique

- **Newton** (1642-1727) : lumière = flux de particules
 - fin XVIII : masse inertielle = masse gravitationnelle
=> lumière déviée par la gravitation
 - 1783: **John Mitchell** imagine une « étoile noire »
 - 1801 : **von Soldner** calcule la déviation d'un rayon lumineux par le soleil
 - 1808 : **Thomas Young**, double fente, interférence,
la lumière est une onde
 - 1815 : **Fresnel** théorie ondulatoire
- => déviation des rayons lumineux abandonnée au XIX^e siècle

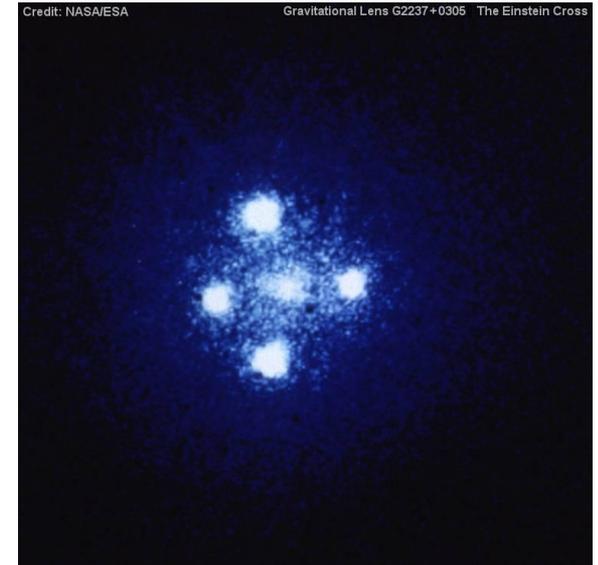
Historique

- 1905 : effet photo-électrique
la lumière est (aussi) de nature corpusculaire
- 1915 : **Einstein**, Relativité Générale
la masse courbe l'espace-temps
et dévie la lumière
- 1919 : **Arthur Eddington** observe la déviation de la lumière
par le soleil lors d'une éclipse solaire:
1.75 seconde d'arc = $8.5 \mu\text{rad}$
comme prédit par Einstein
2 fois plus que calculé par von Soldner



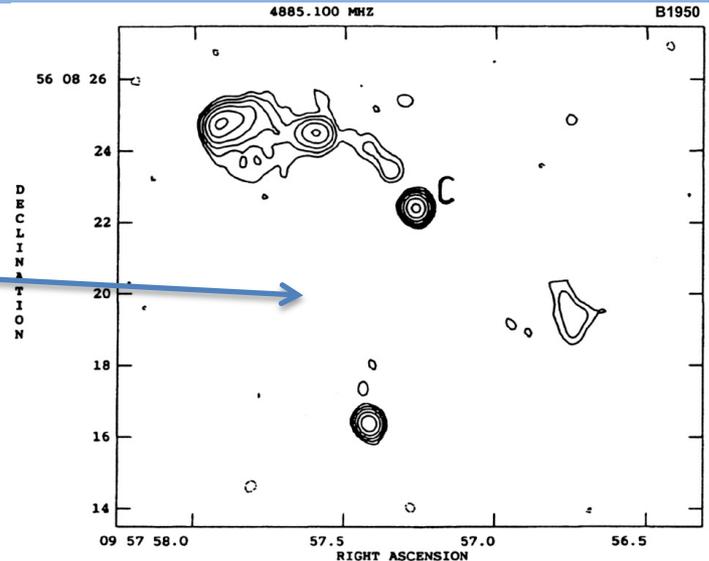
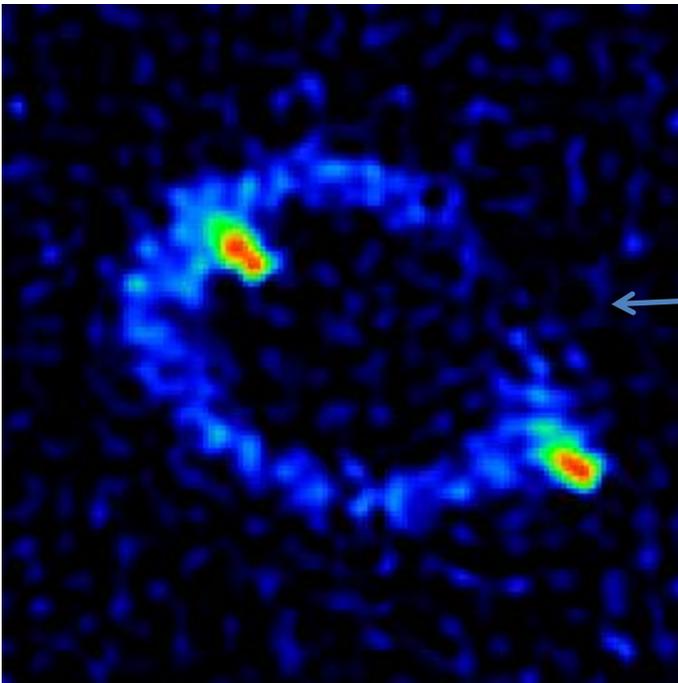
Historique

- 1920 : **Eddington**, possibilité d'images multiples
- 1924 : **Chwolson** si source, lentille et observateur alignés on va observer un anneau
- 1936 : **Einstein** formalise les lentilles gravitationnelles mais il ne les croit pas observables en pratique
- 1937 : **Fritz Zwicky**: si lentille = galaxie, observable



Historique

- 1979 : 1^{ère} observation d'une lentille à Kitt Peak (Arizona)
2 quasars jumeaux
Dennis Walsh



- 1988 : 1^{er} anneau d'Einstein au VLA (radio)
Jacqueline Hewitt
- 1998 : 1^{er} anneau d'Einstein complet
(Hubble Space Telescope)

Et la lumière chut

ou pourquoi la lumière tombe

masses inertielle et grave

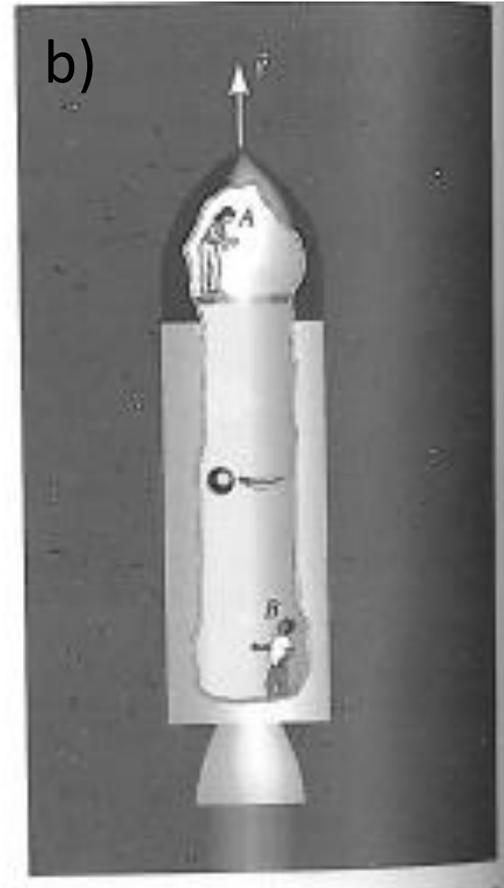
- masse **inertielle** : $\Sigma F = m_i a$
- masse **grave** : force entre 2 astres $F_{12} = G \frac{m_{g,1} \times m_{g,2}}{r_{12}^2}$
poids dans un champs gravitationnel $F = m_g g$
- $m_i = m_g$ Galilée (1610), Eötvös (1888) 10^{-9} , 1987: 10^{-12}
- tous les objets tombent à la même vitesse $a = g$

Principe d'équivalence

a) $m_i = m_g \Rightarrow$
le boulet et la plume
tombent à la même vitesse

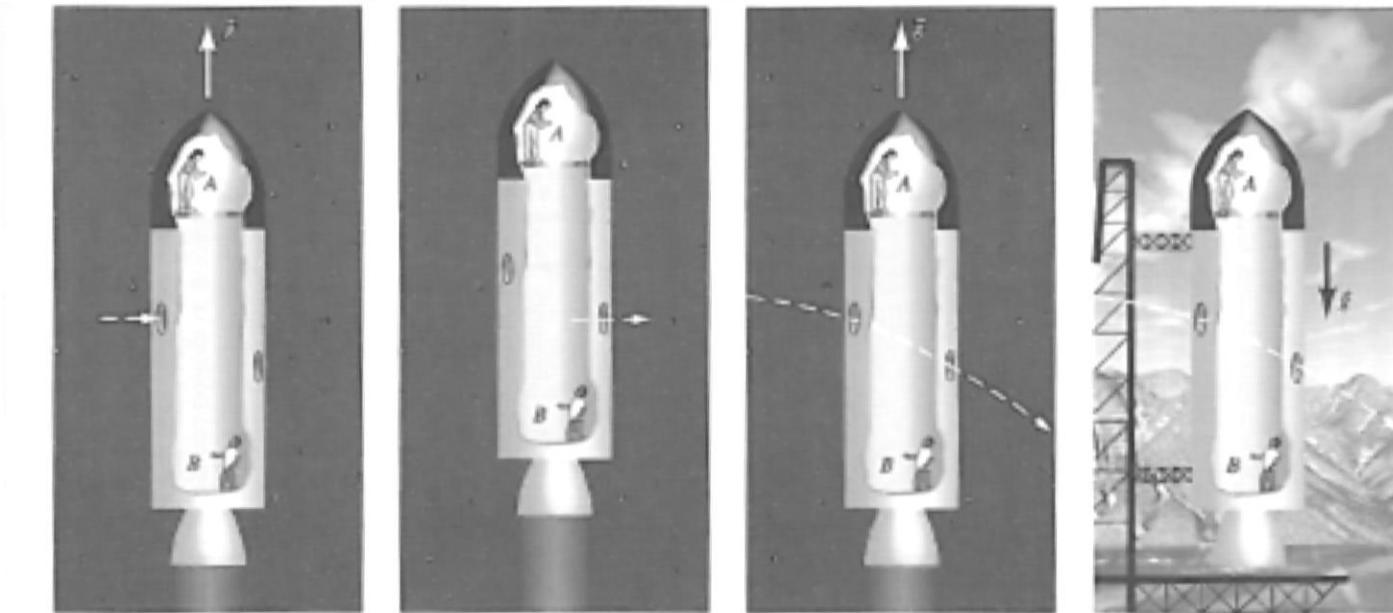
b) le boulet et la plume
subissent la même
accélération g

- un champ gravitationnel uniforme est équivalent à une accélération uniforme



La lumière tombe !

- principe d'équivalence valable pour toutes les lois physiques
y compris la trajectoire des photons



James B. Hartle

- $c \gg g \Delta t \Rightarrow$ l'effet est très faible

L'effet de lentille gravitationnelle

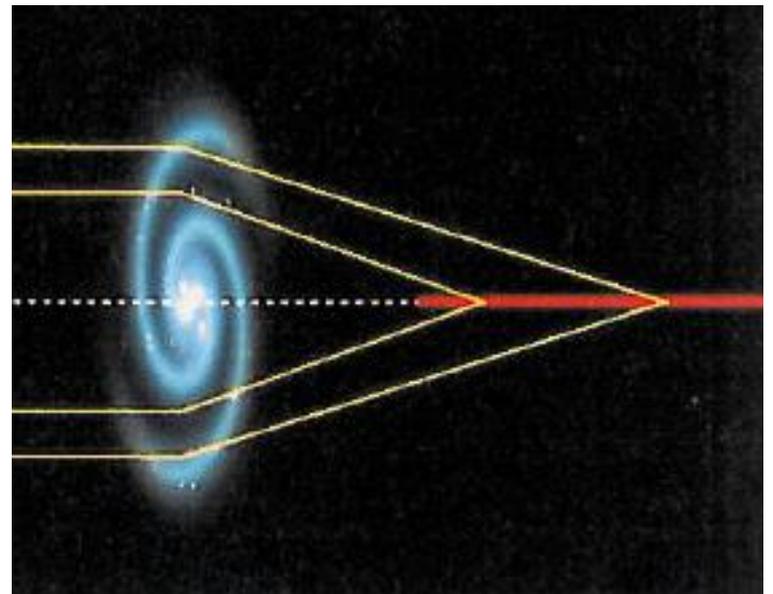
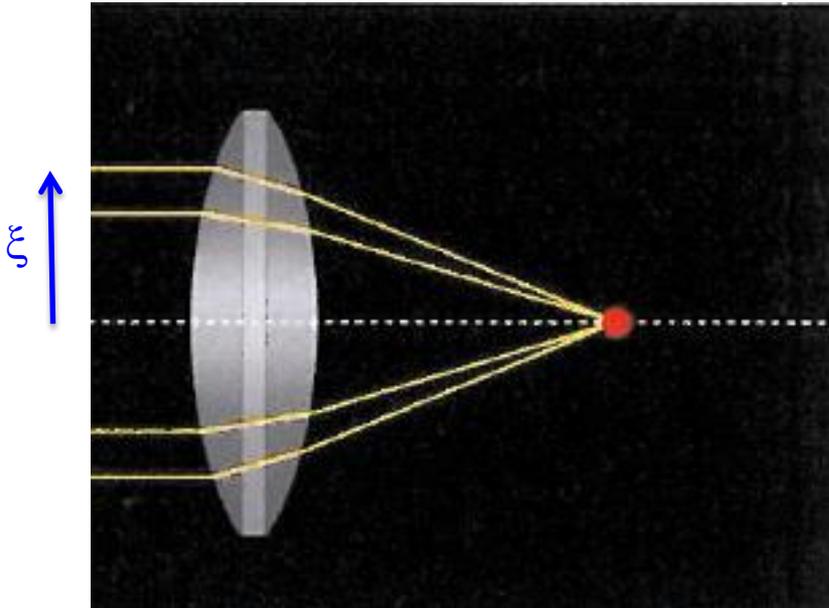
effet de lentille

- la masse dévie la lumière
 ξ paramètre d'impact
 α indépendant longueur d'onde

$$\alpha(\xi) = \frac{4G}{c^2} \frac{M(\xi)}{\xi}$$

$M(\xi)$ masse pour $r < \xi$

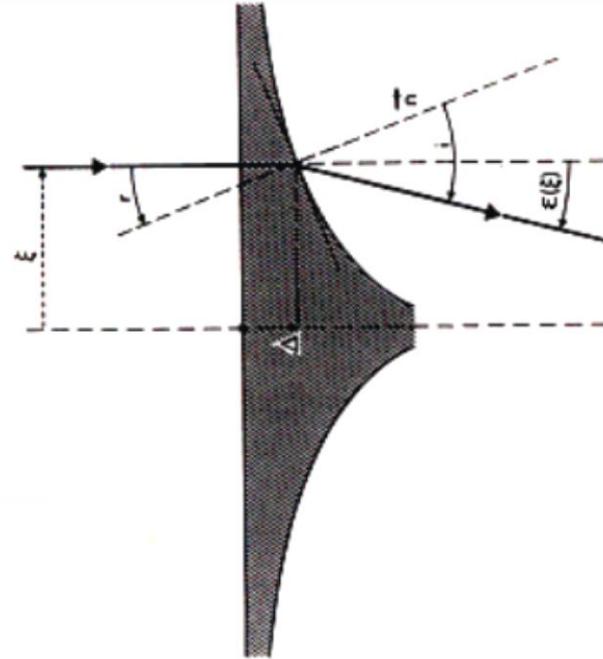
- plus on passe près, plus ça dévie
 pas de point focal mais une **ligne focale**



Equivalent optique

- masse ponctuelle

$$\alpha(\xi) = \frac{4G}{c^2} \frac{M}{\xi}$$



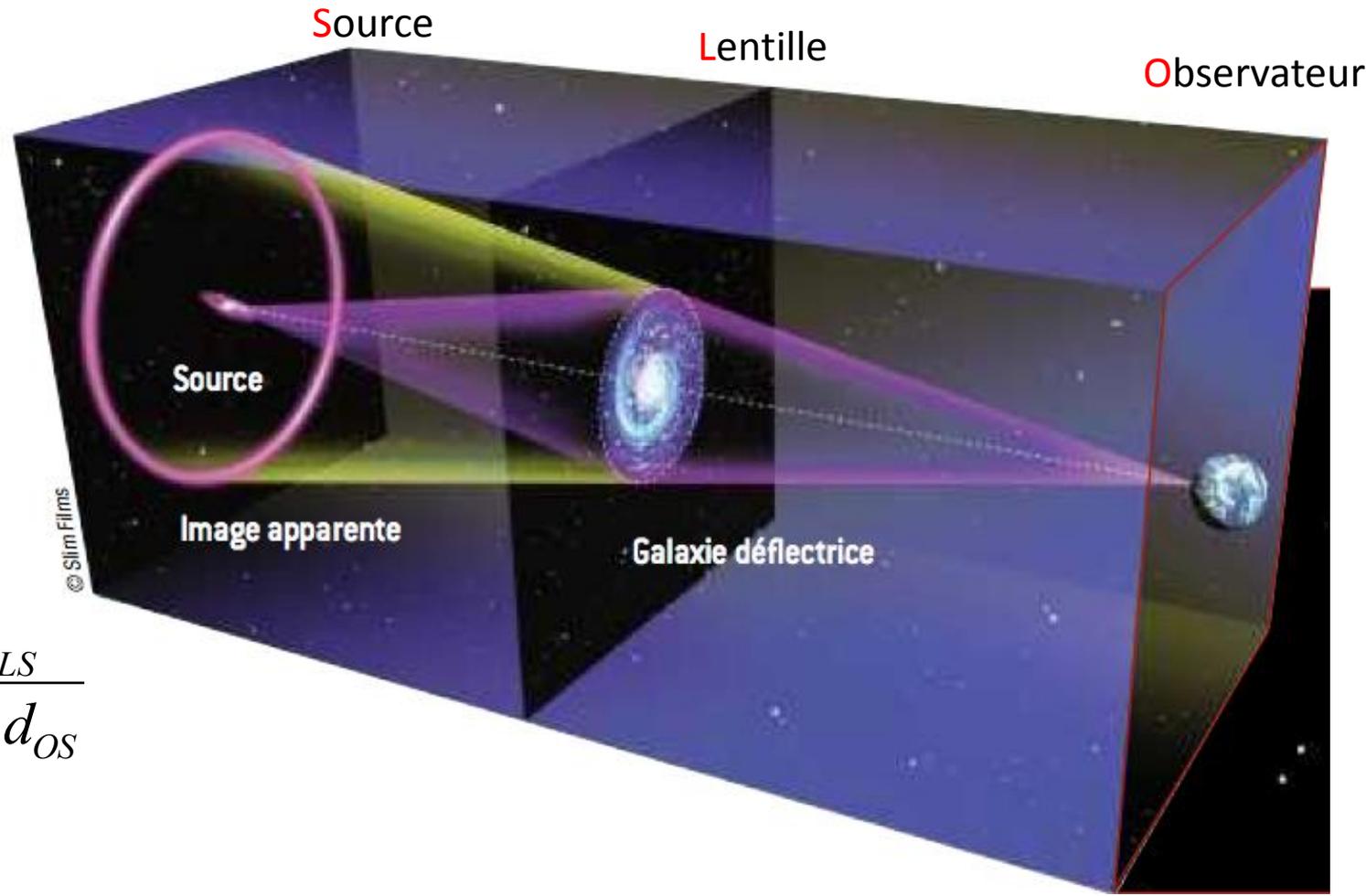
- galaxie spirale

$$\alpha(\xi) = \frac{4G}{c^2} \frac{M(\xi)}{\xi}$$



Anneaux d'Einstein

- source, lentille et observateur alignés



$$\theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_{OL}d_{OS}}$$

Ordres de grandeur

| lentille | mass (M_{\odot}) | d_{OL} (pc) | R (pc) | θ_E (seconde d'arc) |
|------------------------------|----------------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| étoile proche | 1 | 10^4 | $2 \cdot 10^{-8}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ |
| étoile lointaine | 1 | 10^9 | $2 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
| cœur galaxie | 10^{12} | 10^9 | $5 \cdot 10^3$ | 2 |
| cœur amas de galaxies | 10^{14} | 10^9 | 10^5 | 20 |

- $1 M_{\odot}$ = masse solaire

- $1 \text{ pc} = 1 \text{ parsec} = 3.2 \text{ années lumière}$

- $1 \text{ seconde d'arc} = 1/60/60 \text{ degré} = 5 \mu\text{rad}$

les télescopes de 10m ont une résolution $\sim 0.2''$

$$\theta_E^2 \approx \frac{2G}{c^2} \frac{M}{d_{OL}}$$

simulateur optique 1



simulateur optique 2

- voir à La Villette ou bien petit montage :



voir dossier pédagogique sur <http://www2.ulg.ac.be/sciences/lentille/>
qui propose également des lentilles

Lentille symétrique

- source, lentille, observateur alignés

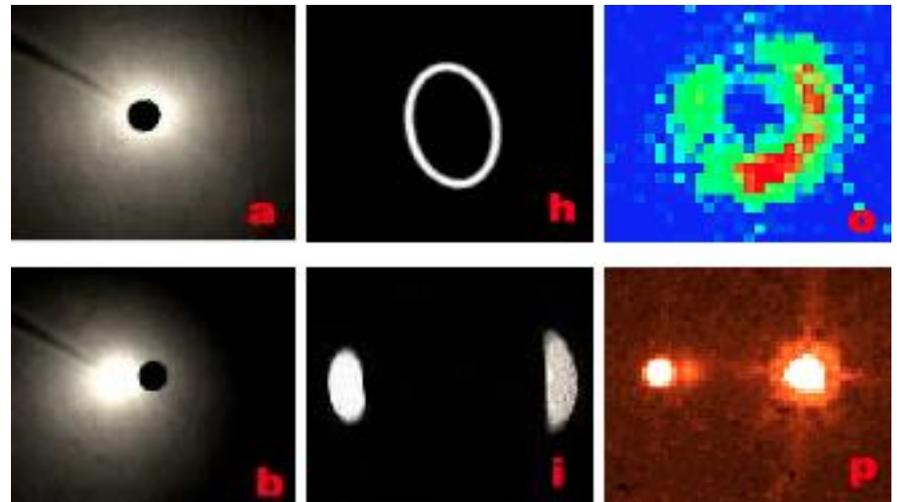
- désalignés

équivalent optique

position observateur

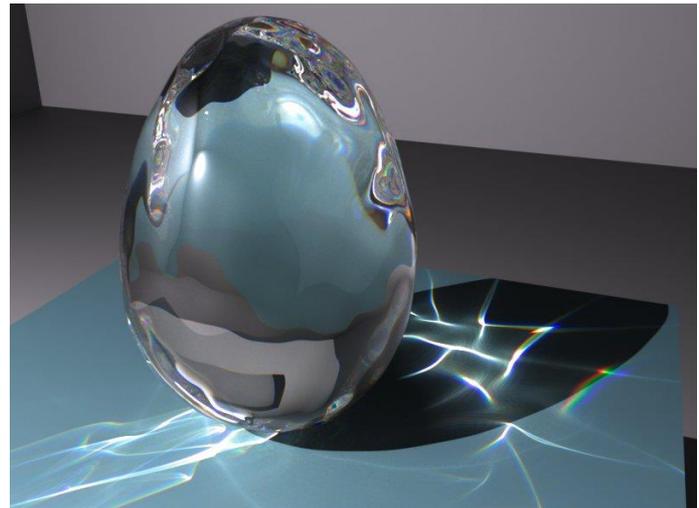
image observée

exemple astrophysique



Lentille asymétrique

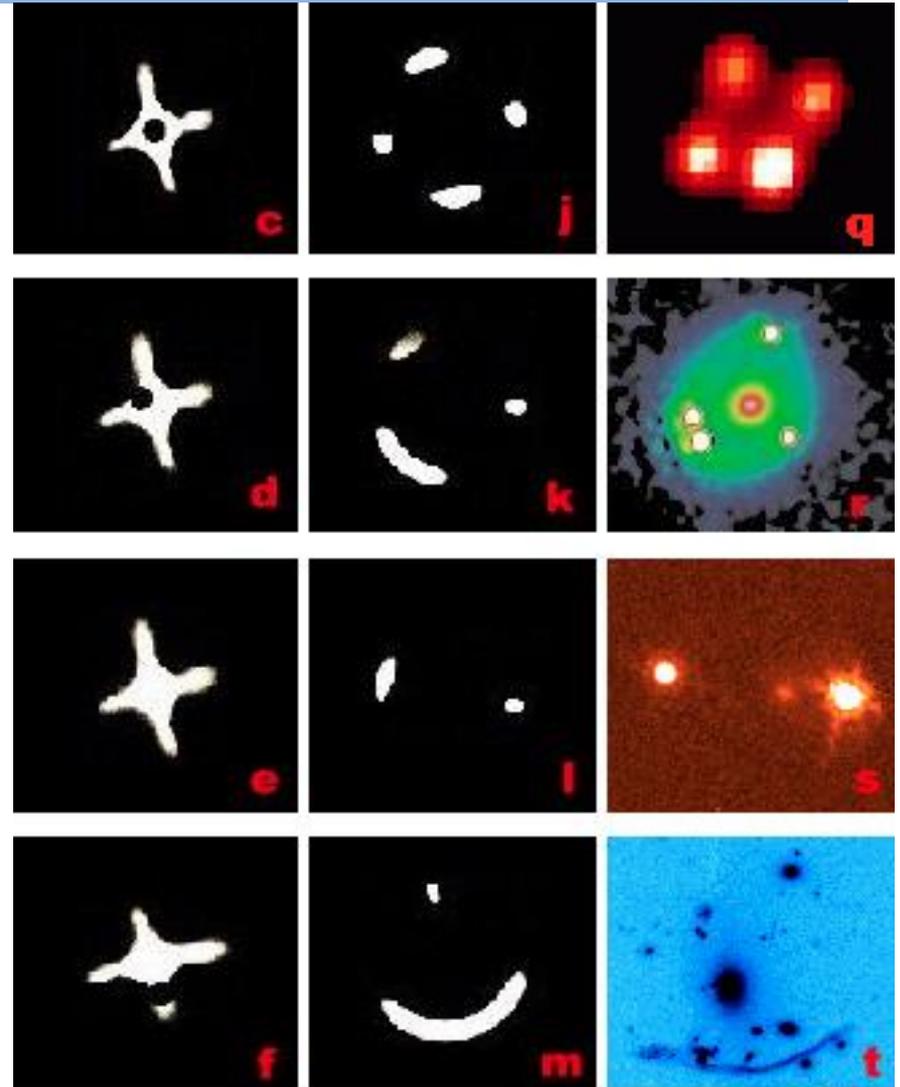
- simulé en inclinant la lentille optique
- ligne focale remplacée par une « caustique »
- exemples de caustiques :



fortes amplifications !

Lentille asymétrique

- caustique, section avec 4 pointes et 4 creux
- différentes positions observateur / caustique



Effets des lentilles

- **Changement de position** apparente
détectable seulement si mouvement relatif
(Eddington 1919)
- **déformation** d'objets étendus (galaxies)
- **multiplication**
images supplémentaires par paires
l'image originale souvent cachée
- **grossissement**

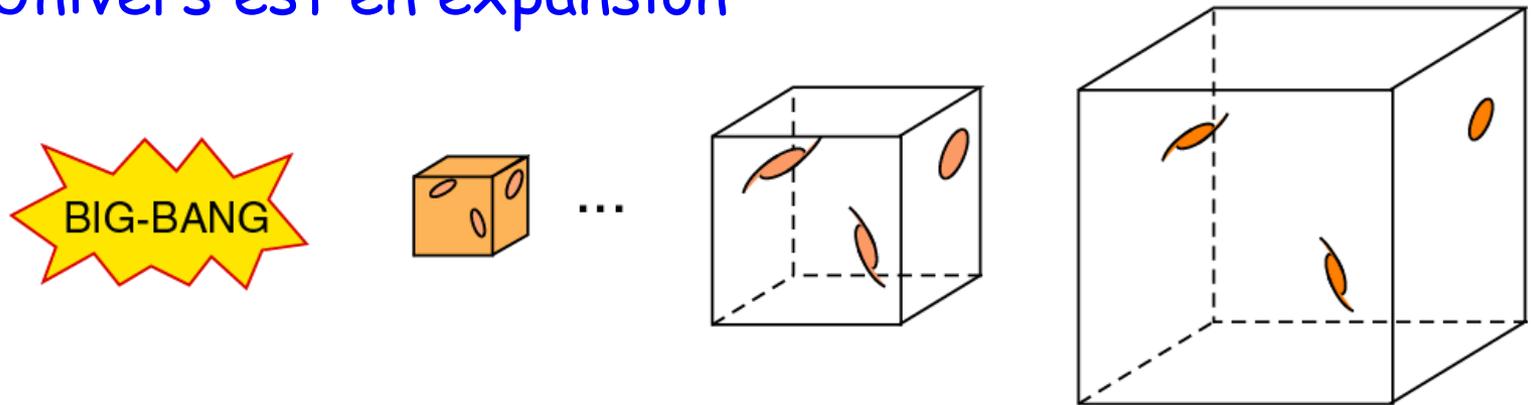
Applications I lentilles fortes

images multiples ou arcs
visibles avec une source et une lentille

Le décalage spectral

- Plus une galaxie est loin, plus elle s'éloigne vite

=> l'Univers est en expansion



- les raies d'émission d'une galaxie lointaine sont **décalées vers le rouge** $\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{labo}} = z \lambda_{\text{labo}}$

- le décalage vers le rouge, z , sert d'échelle de distance ou de temps aux distances cosmologiques

effet de loupe

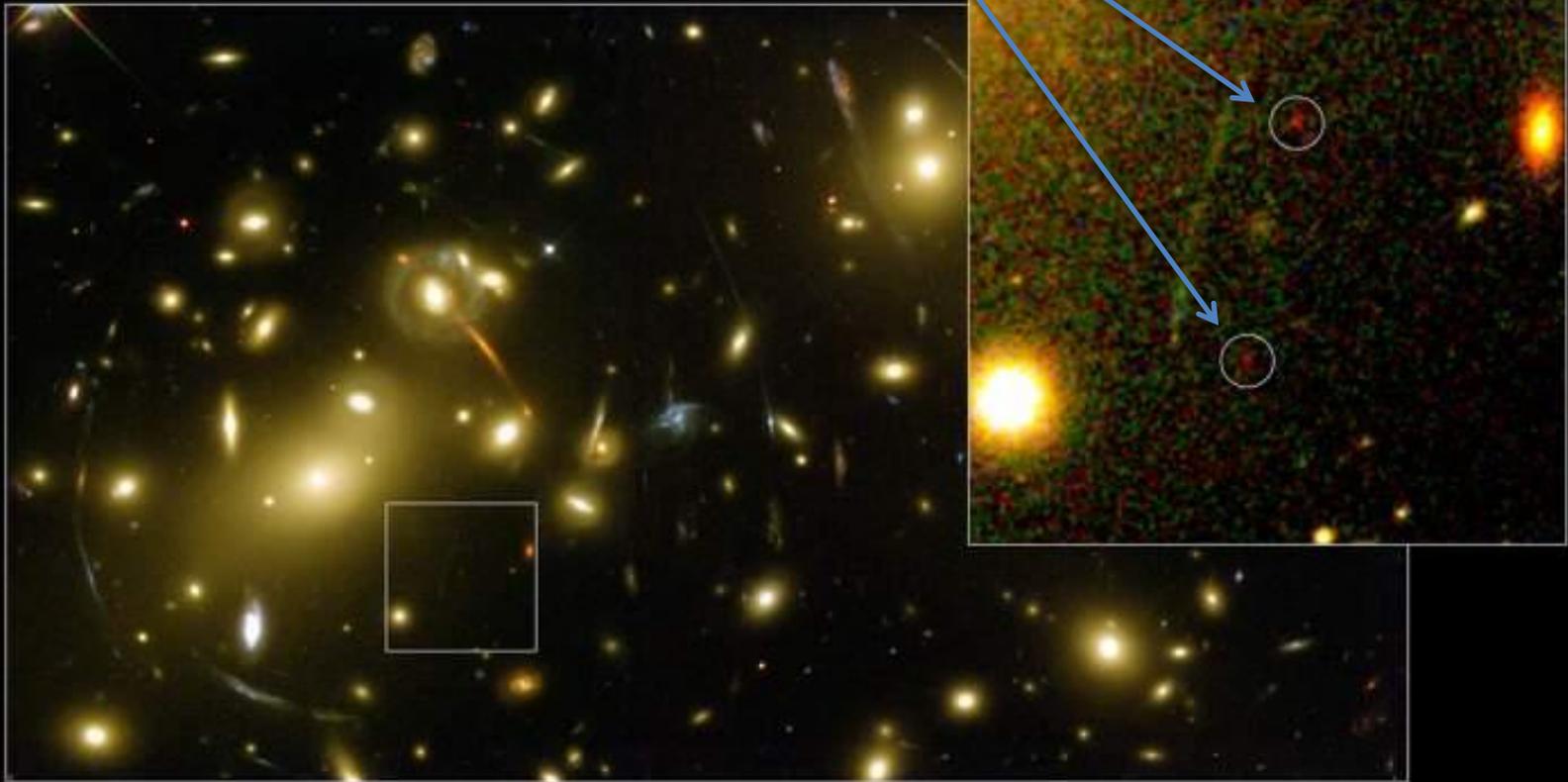
- une lentille gravitationnelle peut **amplifier** la lumière d'un objet lointain **jusqu'à un facteur 100**
- rend accessible à l'observation un objet trop faible ou trop lointain : « télescope gravitationnel »
- meilleure loupe = amas de galaxies
- amas Abell 2218
image double d'une **galaxie à $z \sim 7.0$**
Univers âgé 0.7 milliards d'années
Kneib, Ellis et al., 2004



Une galaxie à $z \sim 7.0$

Abell 2218

magnification facteur ~ 25



étudier la lentille

- au lieu d'utiliser la lentille pour étudier un objet lointain on peut utiliser des objets lointains pour étudier la lentille
- on reconstitue la distribution de **masse totale** (matière ordinaire + matière noire) d'un (gros) amas de galaxies
- résultat: on obtient **bien plus que la masse visible**
on est dominé par la **matière noire**

Amas Abell 1689

- observé avec le télescope spatial Hubble



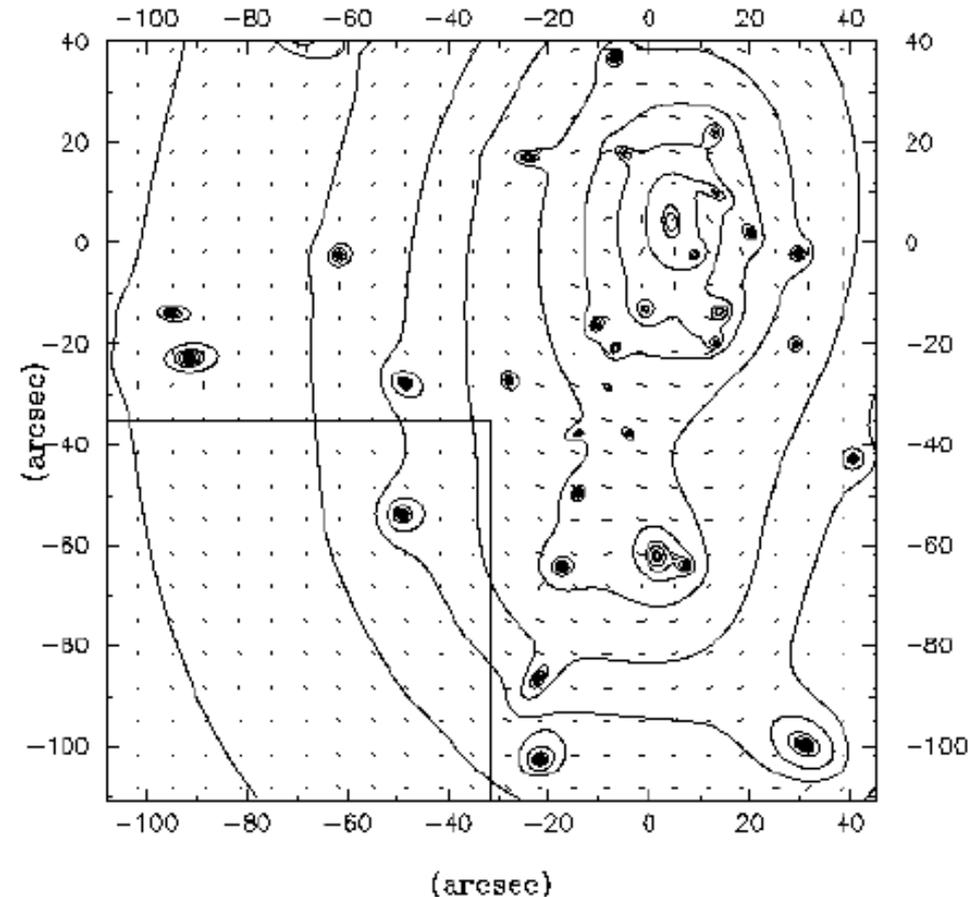
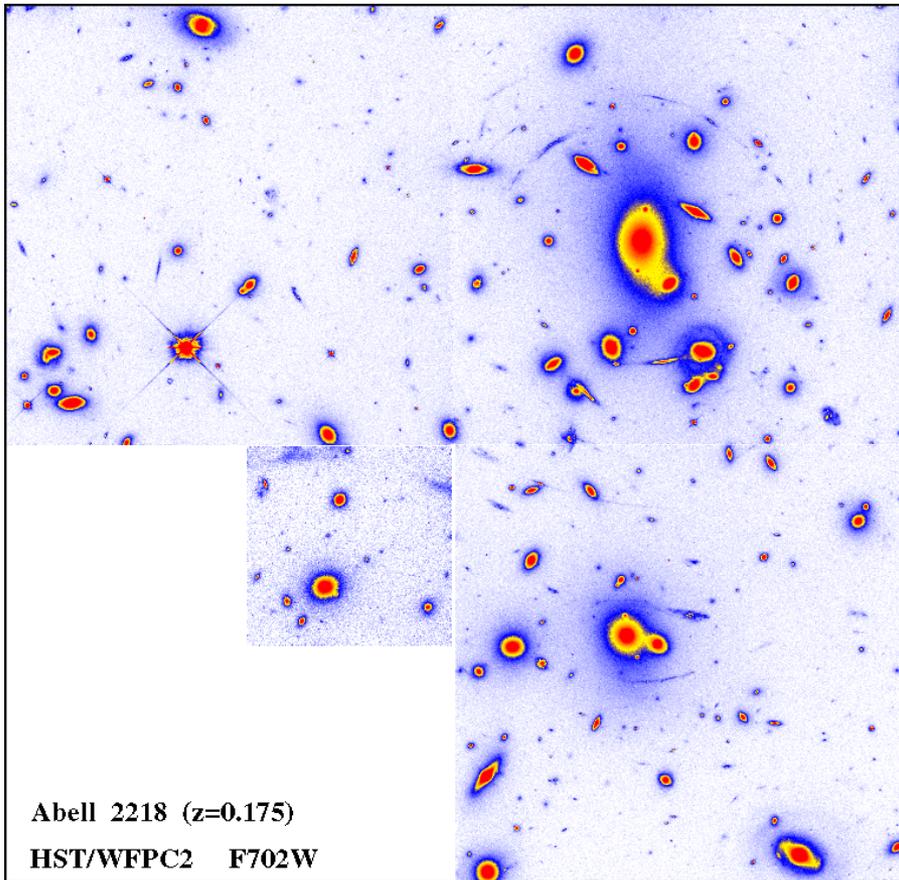
amas Abell 1689 (détails)



- Abell 1689
détail



distribution masse d'Abell 2218

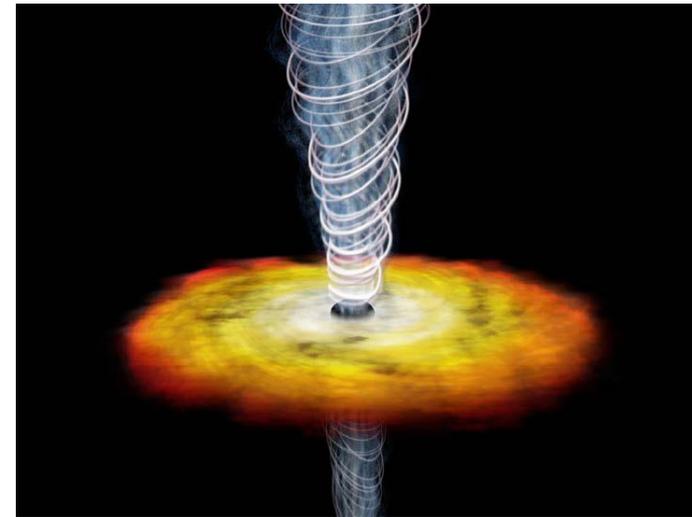


Kneib Ellis, Small, Couch, Sharples 1995

Quasars

- région compacte au centre d'une galaxie massive entourant un trou noir super massif (10^6 à 10^9 masses solaires)

- énergie gravitationnelle
disque d'accrétion avec
énorme friction



- les objets les + lumineux
- observés jusqu'à 29 milliards d'années lumière (*)
- ponctuels
- **luminosité variable** (selon ce qui tombe dedans)

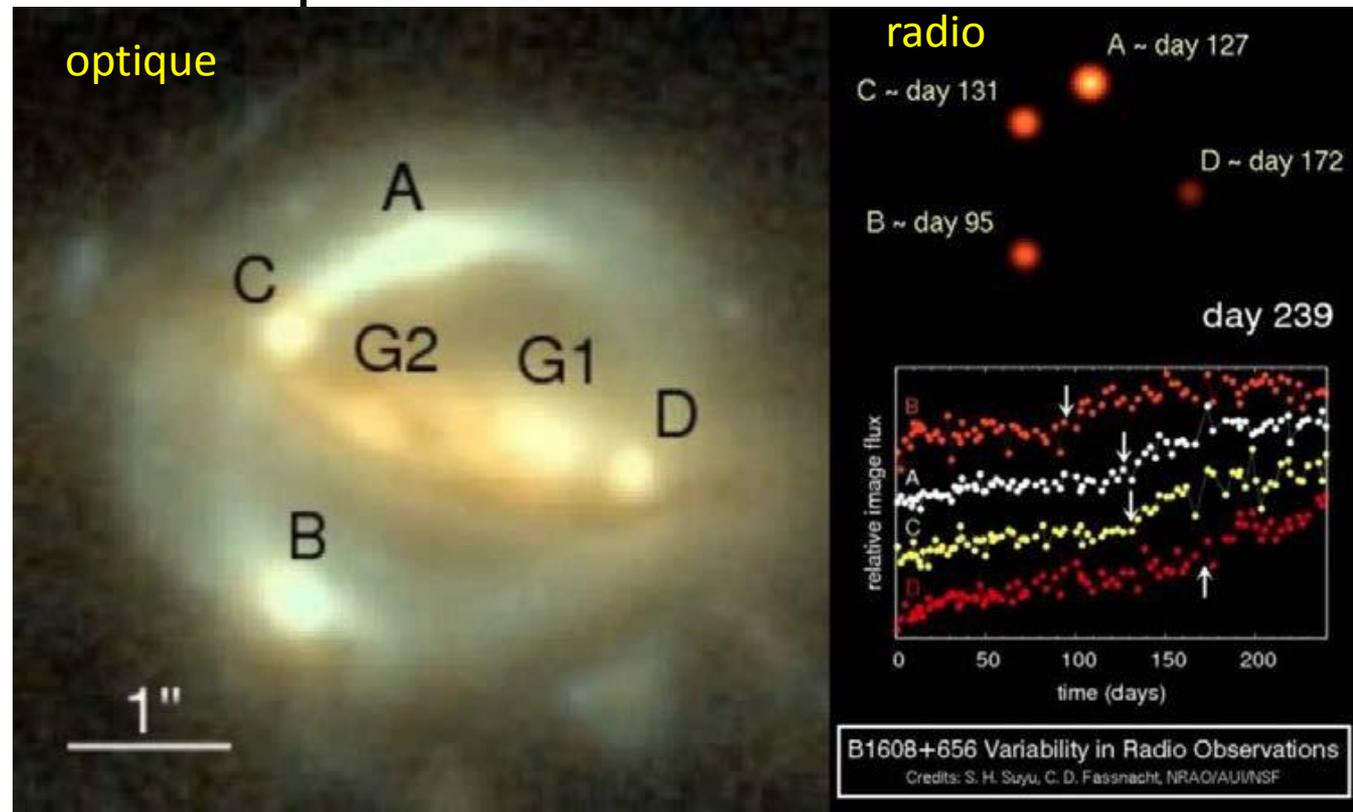
* à cause de l'expansion une telle distance est possible bien que l'univers ait 14 milliards d'années

La constante de Hubble H_0

- Plus une galaxie est loin, plus elle s'éloigne vite
expansion caractérisée par $H_0 \sim 70 \text{ km/s / Mpc}$
- vitesse par effet Doppler (décalage des raies)
- difficile de mesurer des distances et donc H_0
toute une série de mesures successives dont
les erreurs s'ajoutent.

quasars multiples => H_0

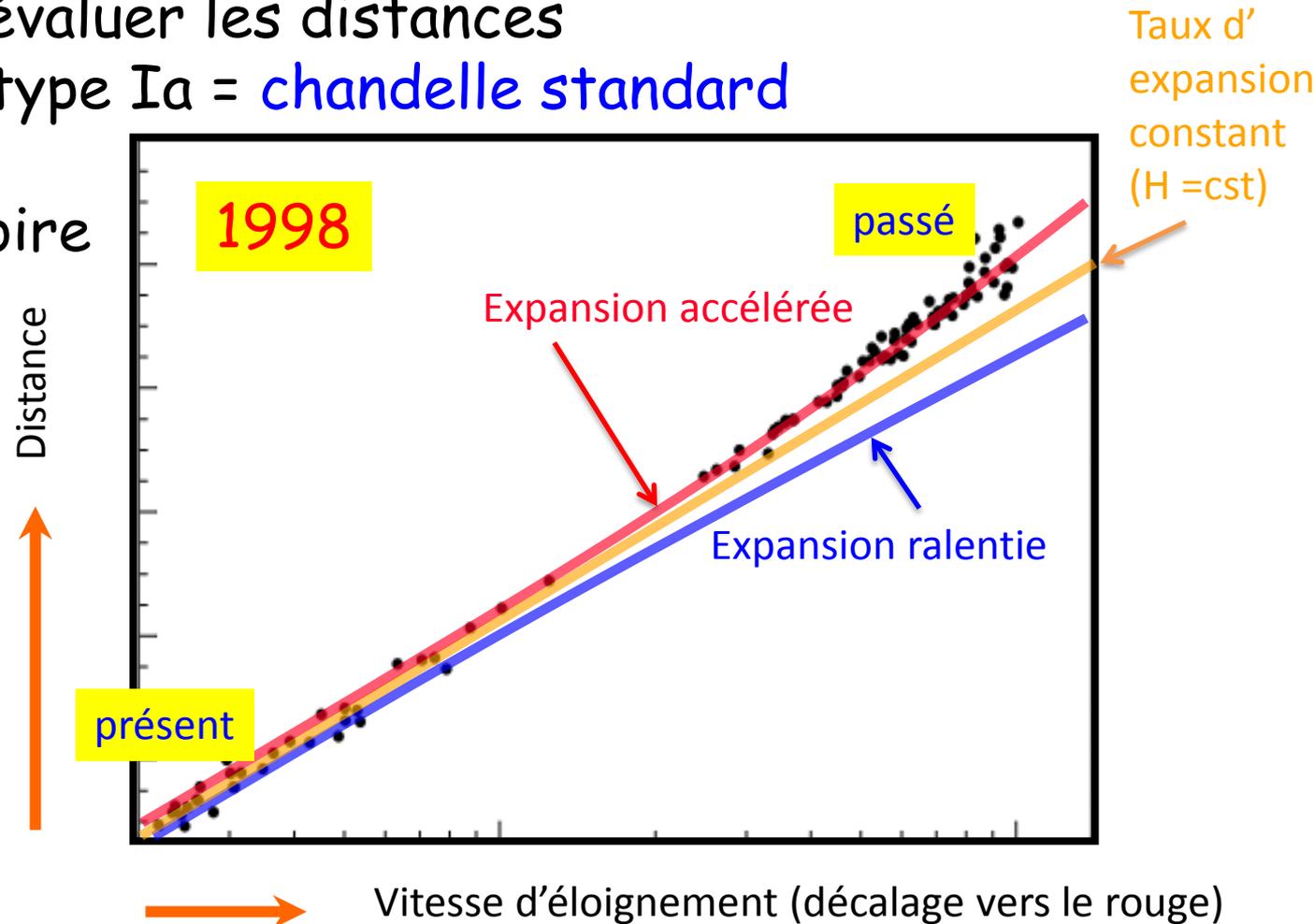
- 4 images différentes (A, B, C, D) avec des chemins optiques différents => **décalage temporel**
- luminosité variable => mesure décalage temporel
- fournit une **échelle** de temps et donc **de distance**



l'énergie noire

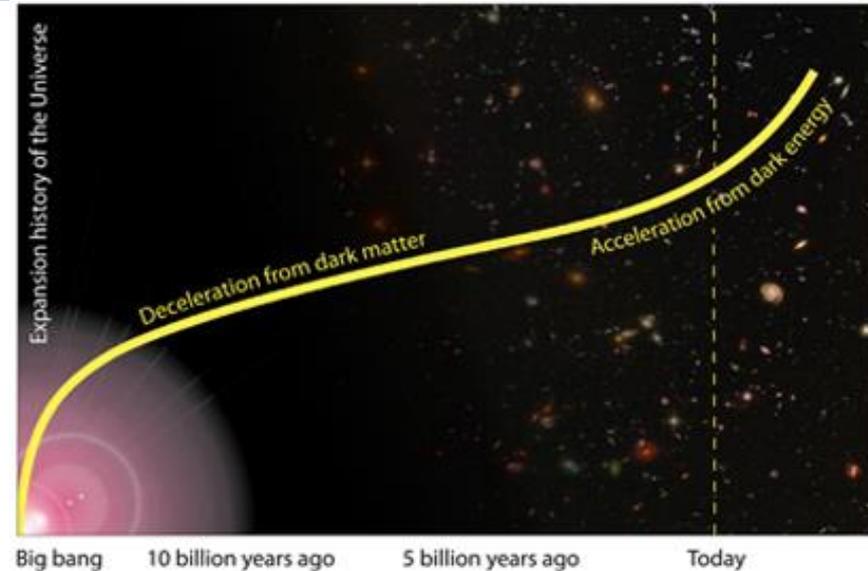
- l'expansion freinée par gravitation => taux décélération ?
- difficulté = évaluer les distances
- Supernovae type Ia = **chandelle standard**

=> l'énergie noire



Quasars multiples et énergie noire

- densité énergie noire constante
- plus il y a d'énergie noire,
plus l'Univers est grand
moins il y a de coïncidences
de lignes de visée
moins il y a de quasars multiples



- nombre de quasars multiples
densité énergie noire = $62 \pm 7 \%$ (E. Falco 1998)
- satellite Planck : $69 \pm 2 \%$ (2013)

Applications II

lentilles faibles

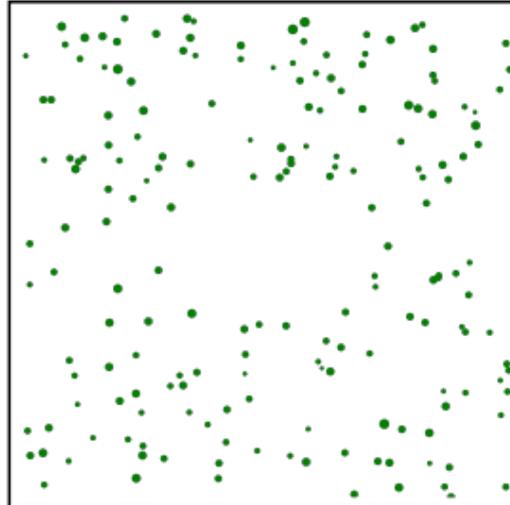
- la plupart du temps pas d'arcs ou d'images multiples
- effet de lentille faible, vue statistiquement en moyennant sur de nombreuses galaxies sources
- lentille = amas, galaxie, structures à grande échelle

distorsion par lentille faible

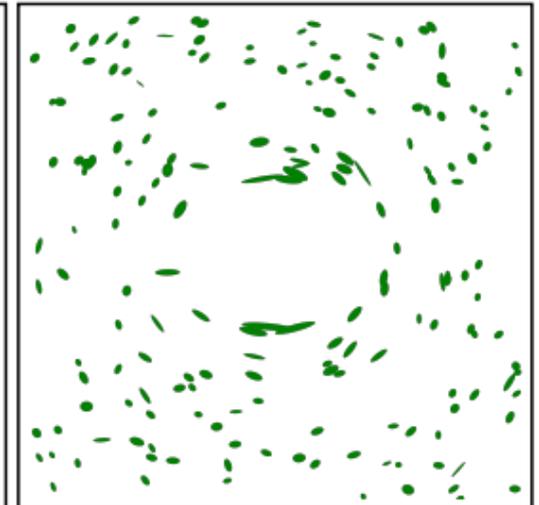
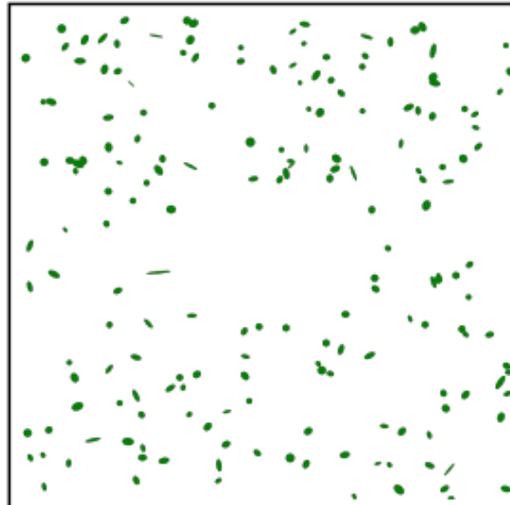
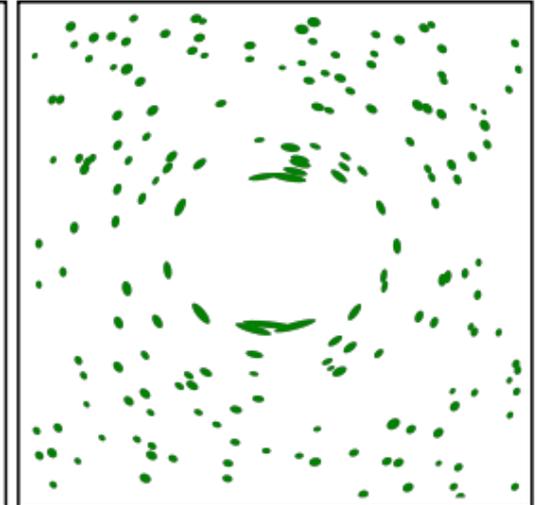
- simulation effet de lentille faible
ici effet exagéré,
en réalité juste
des ellipses

- galaxies sources
non sphériques
+ effets observationnels
=> analyse délicate

sans distorsion



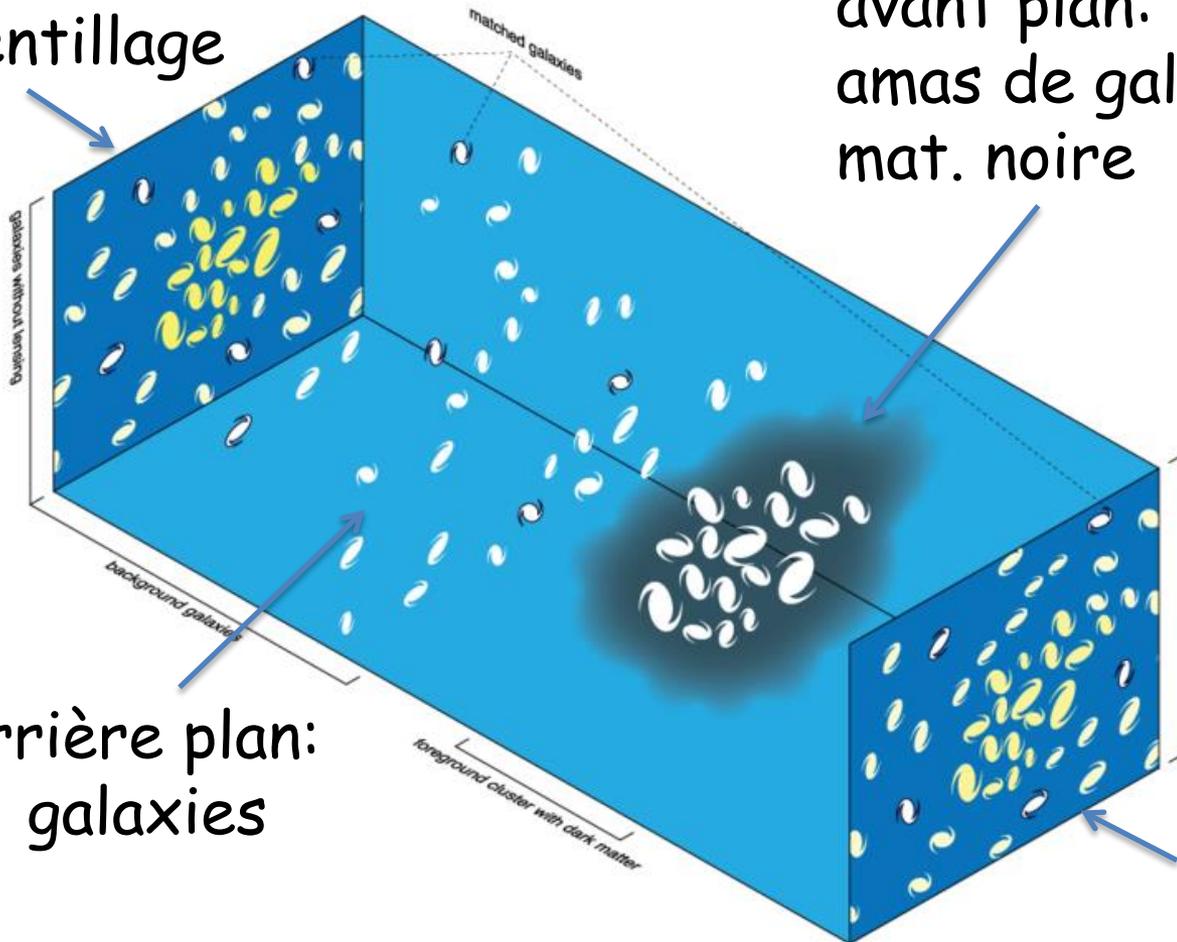
distordu



étude amas de galaxies

galaxies sans
lentillage

avant plan:
amas de galaxies +
mat. noire



la forme des
galaxies est modifiée
l'excentricité change
de plusieurs %

arrière plan:
galaxies

étude amas de galaxies

- mesure masse de l'amas
la masse peut aussi être mesurée en X mais résultat dépend de l'état dynamique et de l'histoire de l'amas
- on mesure la **masse totale** (matière noire domine matière ordinaire)

l'amas du boulet

- collision de deux amas
- optique (Hubble) + X (rouge) + effet lentille faible (bleu)
pas arcs ou d'anneau
- la matière ordinaire (rouge) qui interagit est restée au centre
- la matière noire (bleu) a continué
- preuve de l'existence de la matière noire



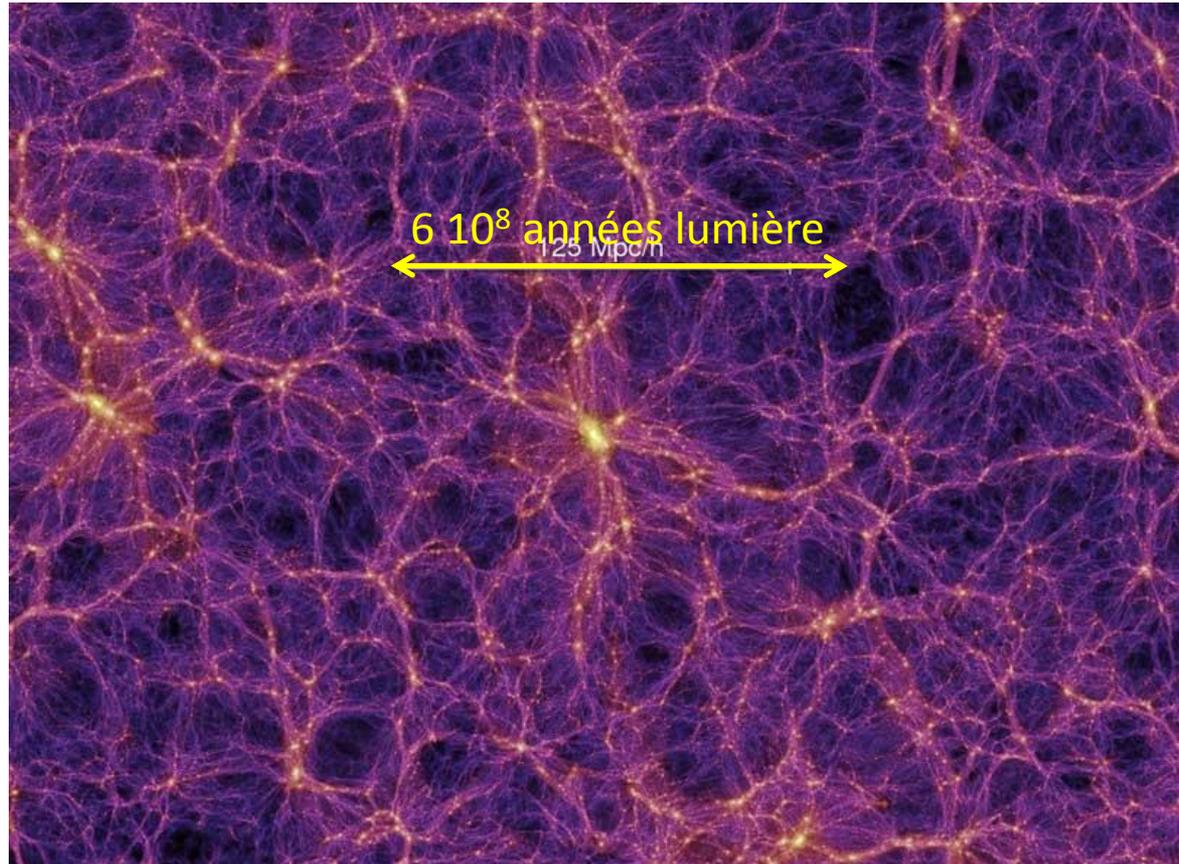
galaxies - galaxies

- effet plus faible qu'avec les amas ($\sim 1\%$)
 - il faut moyenner sur un grand nombre de galaxies
-
- profil de densité
 - rapport lumière / masse
relié au rapport matière ordinaire / matière noire
 - évolution des masses des galaxies avec z
 - ...

Structures à grande échelle

- à très grande échelle ($>10^8$ années lumière)
un **réseau de filaments** avec des galaxies ou des amas aux intersections

simulation d'Univers

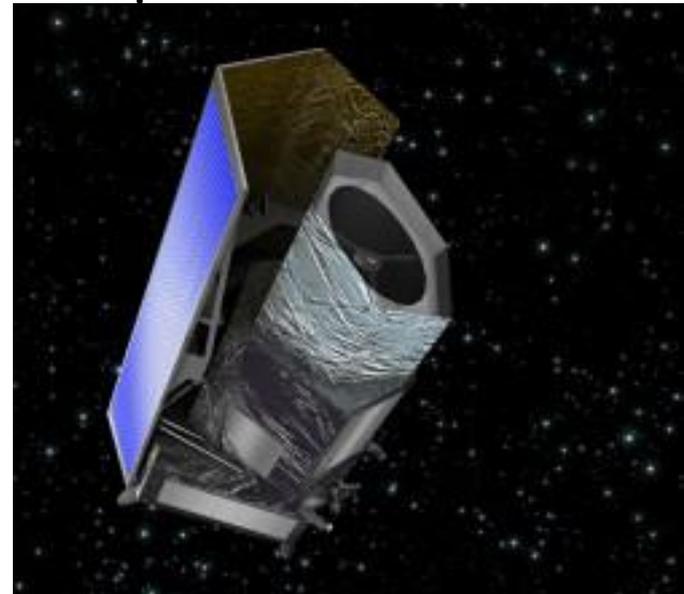


Lentilles faibles et Structures à grande échelle

- effet encore plus faible (0.1 à 1 %)
- mesure des propriétés statistiques des structures (comme pour le fond diffus cosmologique)
- analyse difficile mais potentiellement la meilleure sonde pour l'énergie noire
- pour l'instant des essais avec des télescopes au sol mais atmosphère, déformations télescope

Le projet Euclid

- buts principaux : les oscillations acoustiques de baryons et surtout les lentilles faibles (aussi micro-lentille pour exo planète)
- satellite : élimine effets observationnels (atmosphère, déformations télescope)
- carte en 3D de la distribution de matière noire
- **Equation d'état de l'énergie noire**
 $p = w \rho$
mesurer w à 1%
pour tester différents modèles



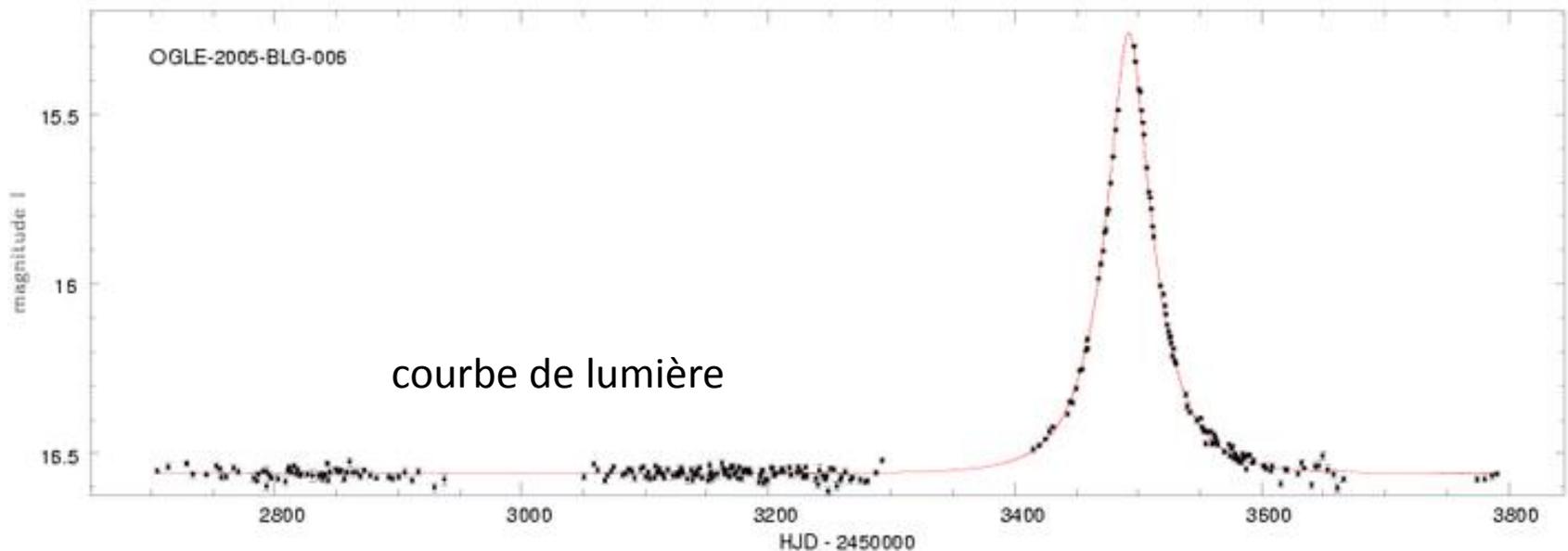
Applications III

micro-lentilles

quand la lentille a une faible masse (planète, étoile)
on n'a pas d'objets multiples ou d'anneau ($\Theta_E^2 \propto M$)
mais si mouvement lentille / source
amplification transitoire (qq jours - qq mois)

micro lentilles

- on peut ainsi détecter un objet sombre quand il passe devant un objet brillant

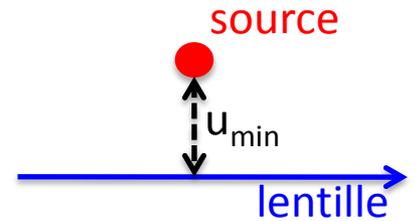


évolution microlentille

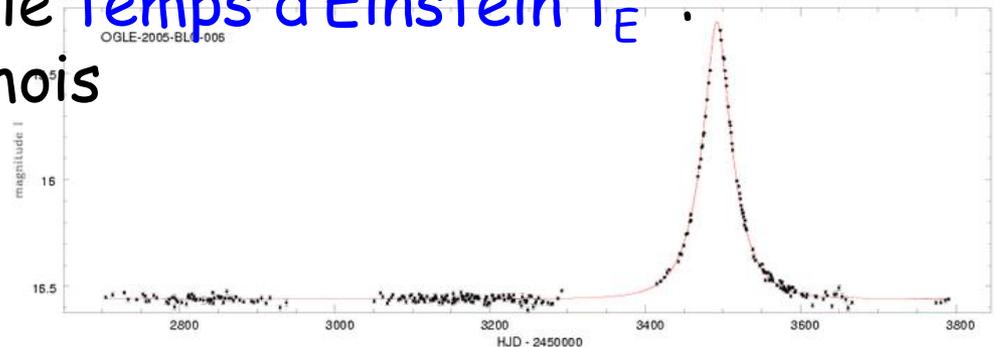
- séparation relative entre source et lentille : $u = \Delta\theta / \theta_E$
- amplification $A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$ (sources et lentilles ponctuelles)

$$A > 1 \quad A(\infty) = 1 \quad A(0) = \infty$$

- évolution en temps $u^2(t) = u_{\min}^2 + \left(\frac{t - t_0}{t_E}\right)^2$



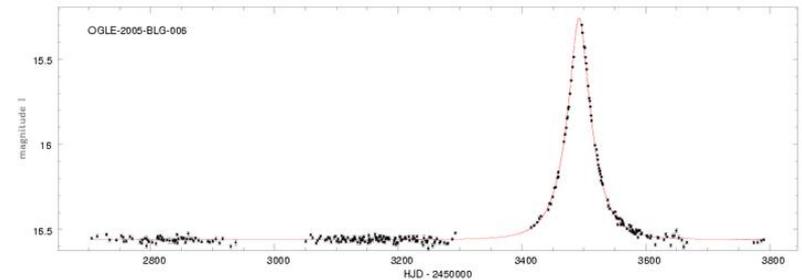
- une seule information, le **temps d'Einstein t_E** : qq jours à qq mois



recherche de Macho

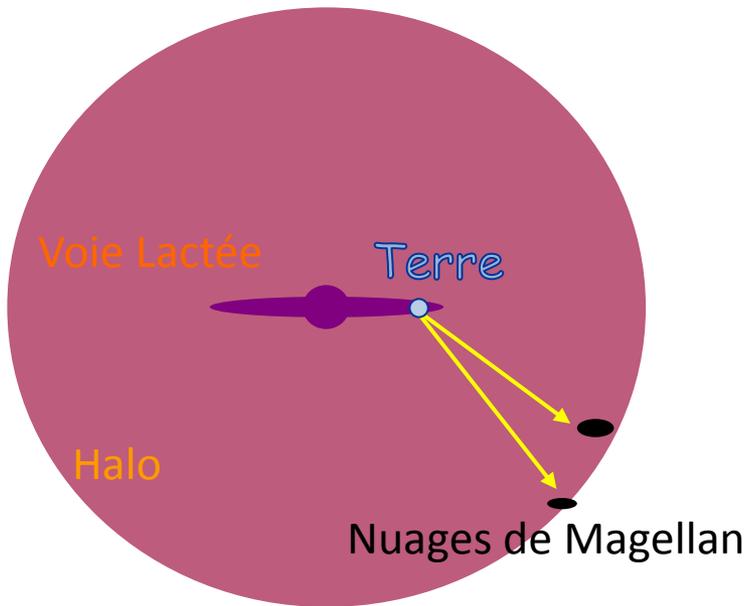
- Macho = Massive Astrophysical Compact Halo Objects (des sortes de Jupiter) candidats pour matière noire
 - proba $1.2 \cdot 10^{-7}$ vers le nuage de Magellan
 $2.4 \cdot 10^{-6}$ vers le bulbe galactique
- => relevé de millions de sources pendant plusieurs années

- deux 1^{er} événements en 1993 par **Macho** (Australie) et **Eros** (expérience de Recherche d'Objets Sombres, France)



EROS

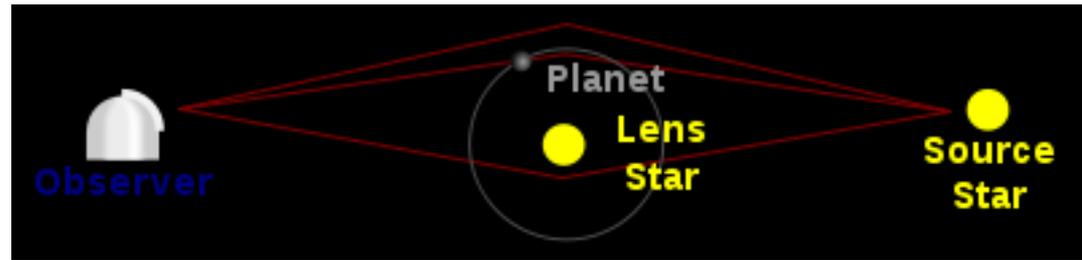
EROS à La Silla, Chili



- 30 millions d'étoiles observées
- moins de 10% de notre halo sous forme de *Macho*

exoplanètes

- lentille = étoile + planète



- **lentille non ponctuelle**
=> courbe plus compliquée mais plus d'information
- si la source est sur une caustique,
=> déviation importante / approx ponctuelle
=> **masse et séparation de la planète**
- avantage: fonctionne même avec des **planètes peu massives**
- seulement 13 détections (sur 941, aout 2013)

Résumé - conclusions

- La déviation des rayons lumineux par la matière a fourni la **première confirmation de la relativité générale**
- l'idée de lentille gravitationnelle est apparue rapidement mais elle ne paraissait pas observable en pratique
- 1^{ère} observation en 1979
- c'est maintenant un **outil très utile** en astronomie depuis les exo-planètes jusqu'à la cosmologie

Résumé - conclusions

- **Lentilles fortes**
 - effet de loupe
 - mesure distribution de masse des gros amas de galaxies
 - quasars: mesure de H_0 et de la densité d'énergie noire
- **lentilles faibles**
 - distribution de masse des amas
 - amas du boulet = preuve de la matière noire
 - étude des galaxies
 - structures à grande échelle -> énergie noire
- **microlentilles**
 - Machos (candidats matière noire)
 - exo-planètes

Conférences NEPAL

- Nucléaire Et Particule Au Lycée
organisées par le CNRS et le CEA
<http://www.in2p3.fr/> -> conférences Nepal
- Le destin des étoiles
- LHC : la physique à l'aube d'une nouvelle révolution ?
- Les premiers instants de l'Univers en laboratoire ?
- Où est passé l'antimatière ?
- La matière noire de l'Univers
- L'énergie noire de l'Univers
- d'où viennent les rayonnements cosmiques
- comprendre et utiliser les rayonnements
- quelle énergie pour le XXI^{ème} siècle ?
- quel traitement pour les déchets nucléaires ?