

Sur les traces de la matière dans le cosmos

Réza Ansari

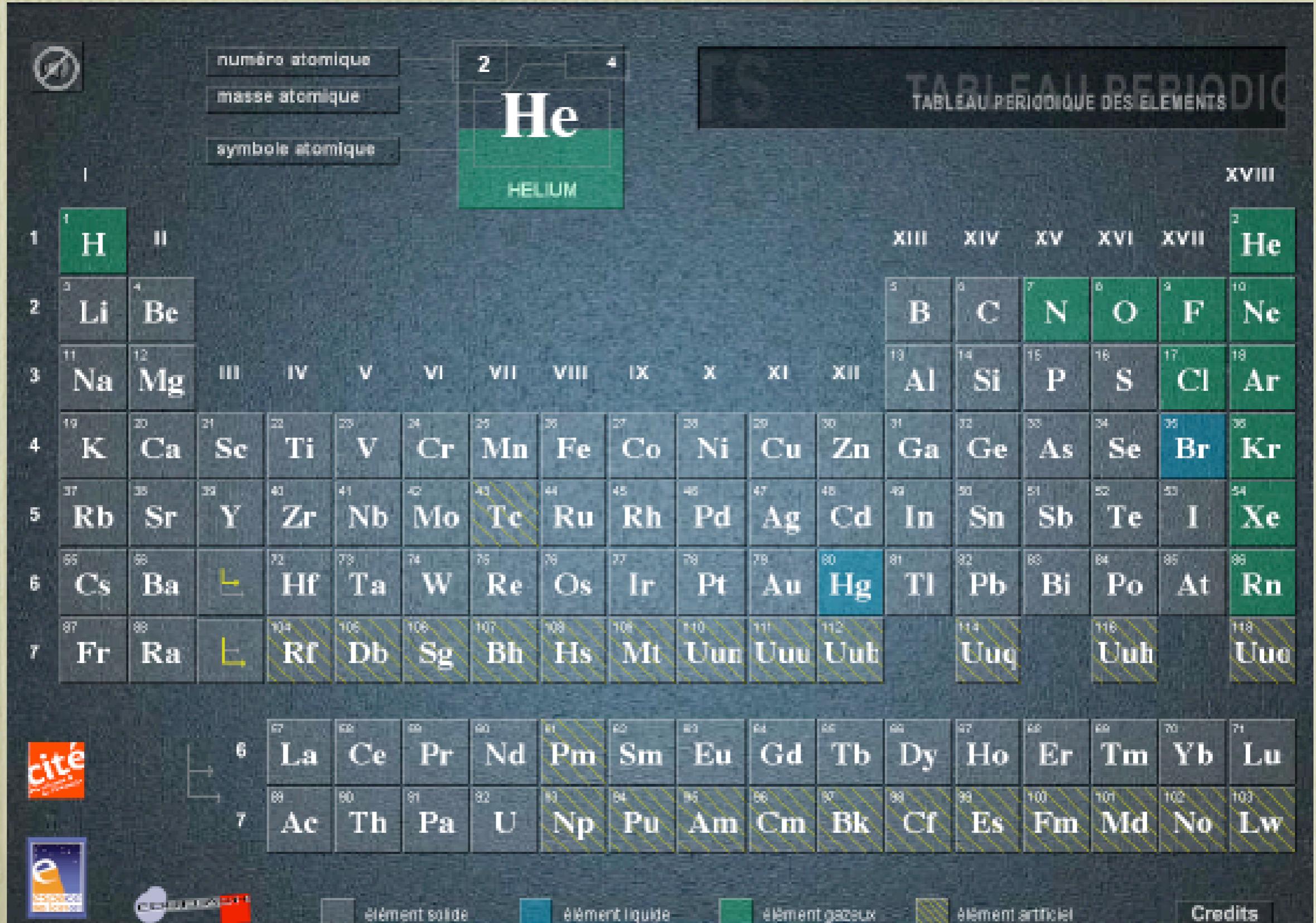
(Université Paris-Sud, LAL/IN₂P₃-CNRS)

- ◆ La matière sous toutes ses formes
- ◆ La matière noire dans notre Galaxie
 - Le halo sombre de notre Galaxie
 - Un trou noir au centre de la Voie Lactée ...
- ◆ Les supernovae lointaines et le mystère de l'énergie noire

La matière ordinaire (baryonique)

(Tableau périodique des éléments)

http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/expo/tempo/aluminium/science/mendeleiev/



La planète bleue

<http://visibleearth.nasa.gov/>

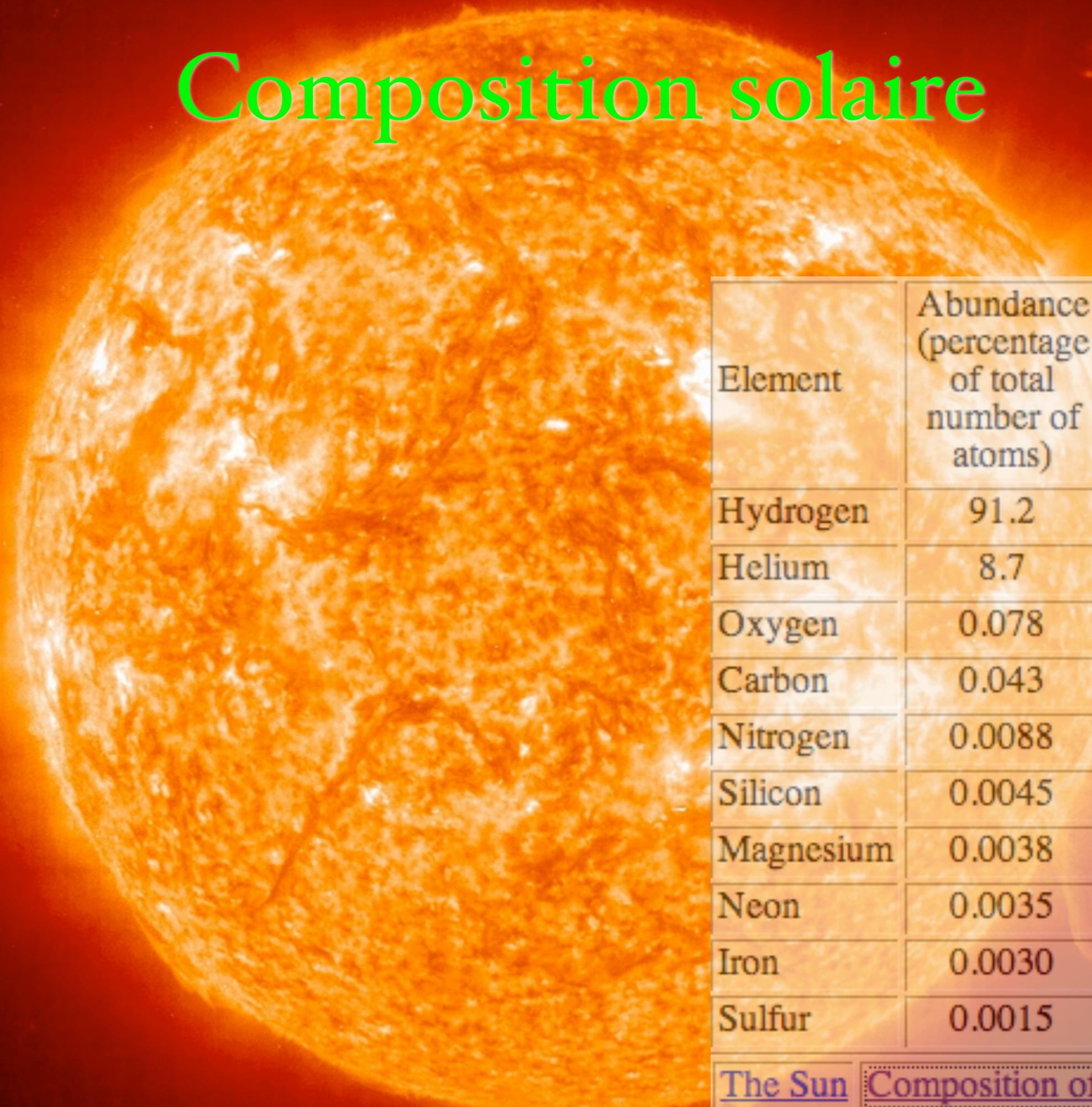
| Element | Approximate % by weight |
|------------|-------------------------|
| Oxygen | 46.6 |
| Silicon | 27.7 |
| Aluminum | 8.1 |
| Iron | 5.0 |
| Calcium | 3.6 |
| Sodium | 2.8 |
| Potassium | 2.6 |
| Magnesium | 2.1 |
| All others | 1.5 |

| Element | Symbol | Atomic Number | Percent in Universe | Percent in Earth | Percent in Human Body |
|------------|--------|---------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| Hydrogen | H | 1 | 91 | 0.14 | 9.5 |
| Helium | He | 2 | 9 | Trace | Trace |
| Carbon | C | 6 | 0.02 | 0.03 | 18.5 |
| Nitrogen | N | 7 | 0.04 | Trace | 3.3 |
| Oxygen | O | 8 | 0.06 | 47 | 65 |
| Sodium | Na | 11 | Trace | 2.8 | 0.2 |
| Magnesium | Mg | 12 | Trace | 2.1 | 0.1 |
| Phosphorus | P | 15 | Trace | 0.07 | 1 |
| Sulfur | S | 16 | Trace | 0.03 | 0.3 |
| Chlorine | Cl | 17 | Trace | 0.01 | 0.2 |
| Potassium | K | 19 | Trace | 2.6 | 0.4 |
| Calcium | Ca | 20 | Trace | 3.6 | 1.5 |
| Iron | Fe | 26 | Trace | 5 | Trace |

[Image SOHO \(Solar and Heliospheric Observatory\)](http://sohowww.nascom.nasa.gov/)

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Composition solaire



| Element | Abundance (percentage of total number of atoms) | Abundance (percentage of total mass) |
|-----------|---|--------------------------------------|
| Hydrogen | 91.2 | 71.0 |
| Helium | 8.7 | 27.1 |
| Oxygen | 0.078 | 0.97 |
| Carbon | 0.043 | 0.40 |
| Nitrogen | 0.0088 | 0.096 |
| Silicon | 0.0045 | 0.099 |
| Magnesium | 0.0038 | 0.076 |
| Neon | 0.0035 | 0.058 |
| Iron | 0.0030 | 0.14 |
| Sulfur | 0.0015 | 0.040 |

[The Sun](#)

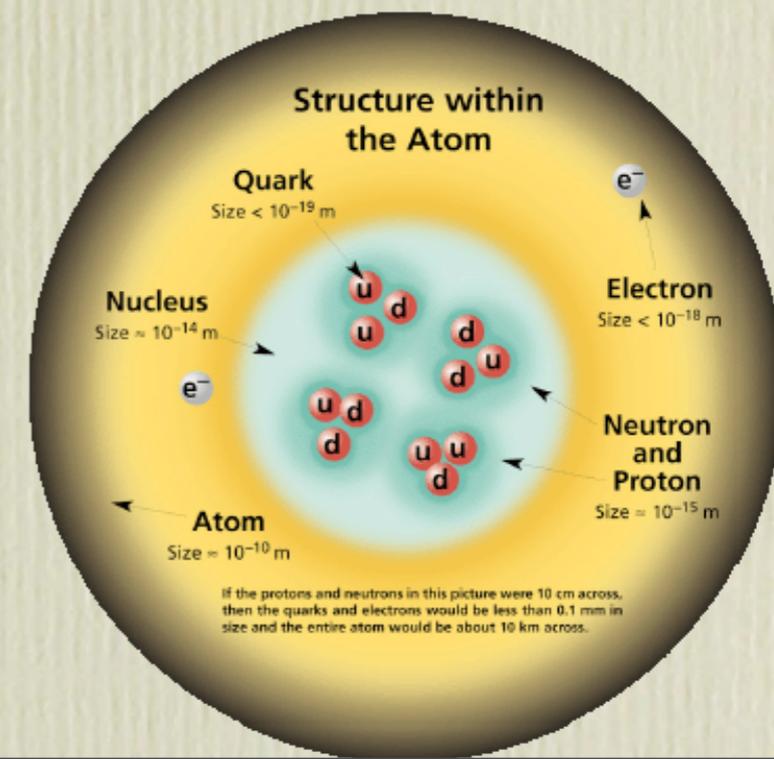
[Composition of Earth's crust](#)

- ◆ Matière formée de quarks et leptons
 - Protons, neutrons, électrons, neutrinos, ...
- ◆ Les quatre interactions fondamentales:
 - Forte (QCD) : gluons
 - **Électromagnétique** (QED) : photons
 - Faible : W,Z
 - **Gravitation** (relativité générale) - dominant à l'échelle de l'univers

La matière est ses interactions

- ◆ Matière formée de quarks et leptons
 - Protons, neutrons, électrons, neutrinos, ...
- ◆ Les quatre interactions fondamentales:
 - Forte (QCD) : gluons
 - **Électromagnétique** (QED) : photons
 - Faible : W,Z
 - **Gravitation** (relativité générale) - dominant à l'échelle de l'univers

La matière autour de nous



La matière autour de nous

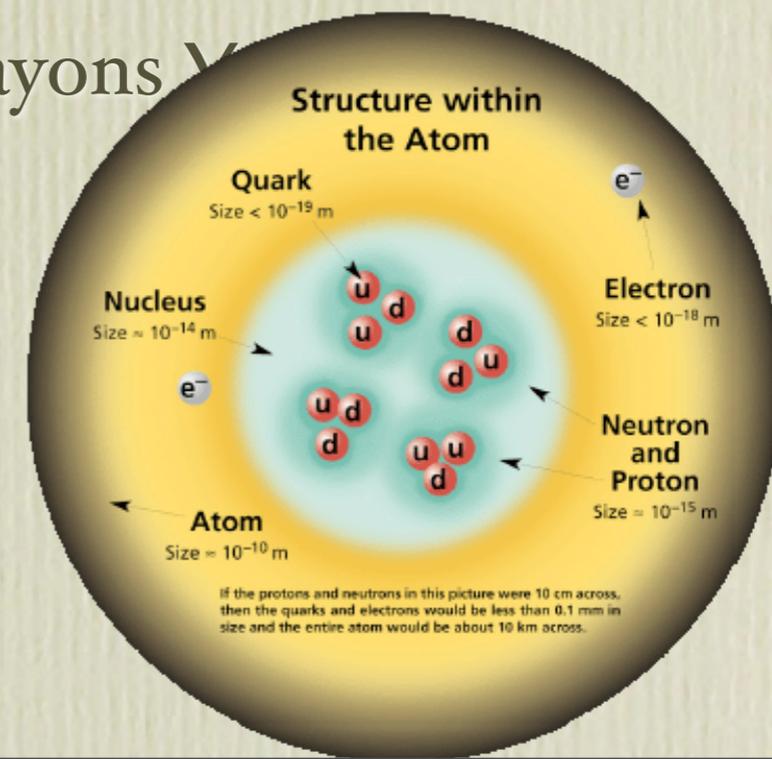
◆ La matière ordinaire (baryonique) formée d'atomes

- Noyau atomique, formé de protons et de neutrons, entouré d'un nuage d'électrons
- Peut être sous forme ionisée (plasma), atomique, moléculaire...

◆ Le rayonnement électromagnétique (photons)

- Ondes radios, lumière visible, UV, rayons X, rayons γ

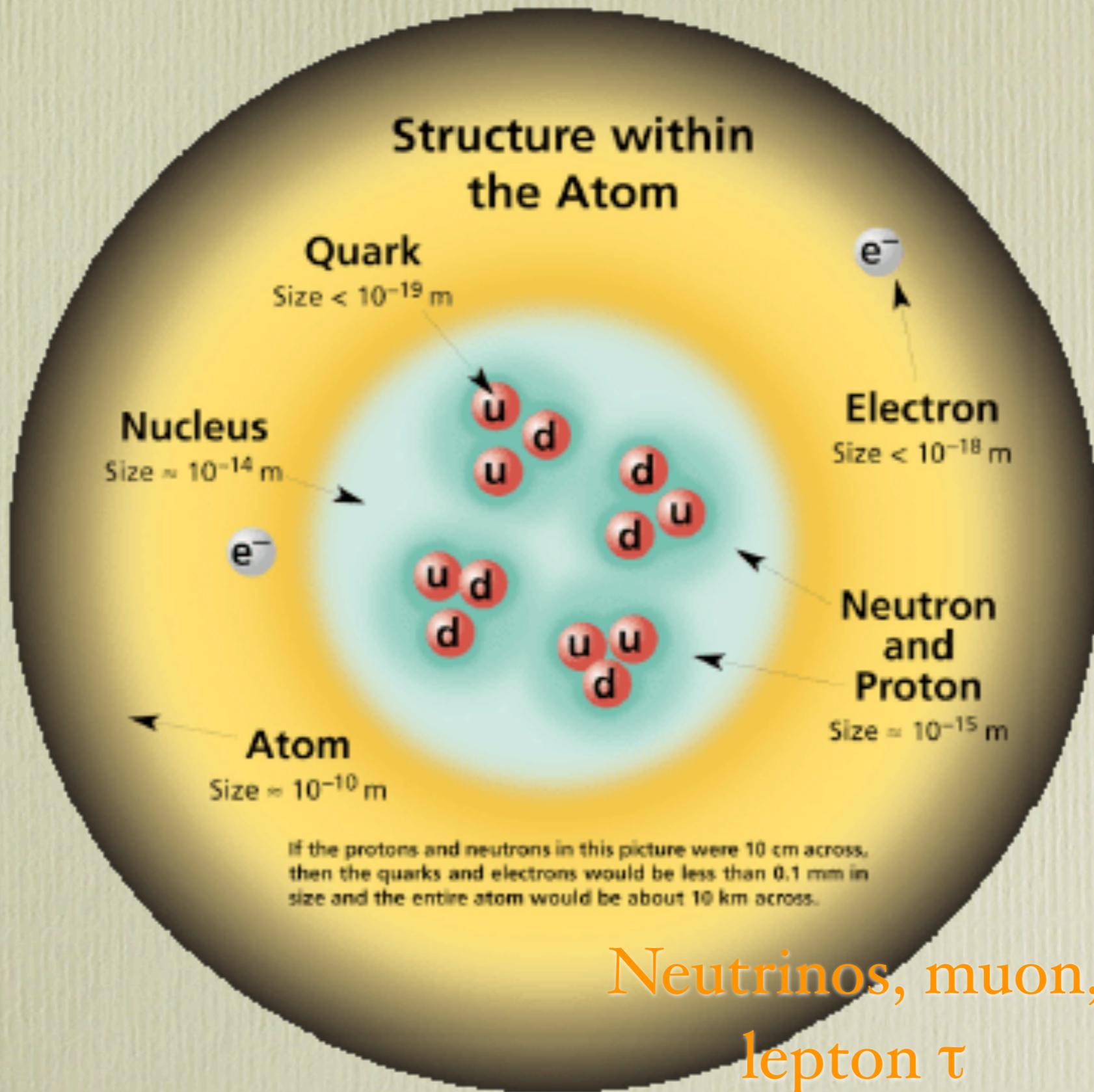
◆ Les neutrinos



<http://www.lal.in2p3.fr/CPEP/adventure.html>

<http://particleadventure.org>

<http://pdg.web.cern.ch/pdg/particleadventure/index.html>



<http://www.lal.in2p3.fr/CPEP/adventure.html>

<http://particleadventure.org>

<http://pdg.web.cern.ch/pdg/particleadventure/index.html>

<http://www.lal.in2p3.fr/CPEP/adventure.html>

<http://particleadventure.org>

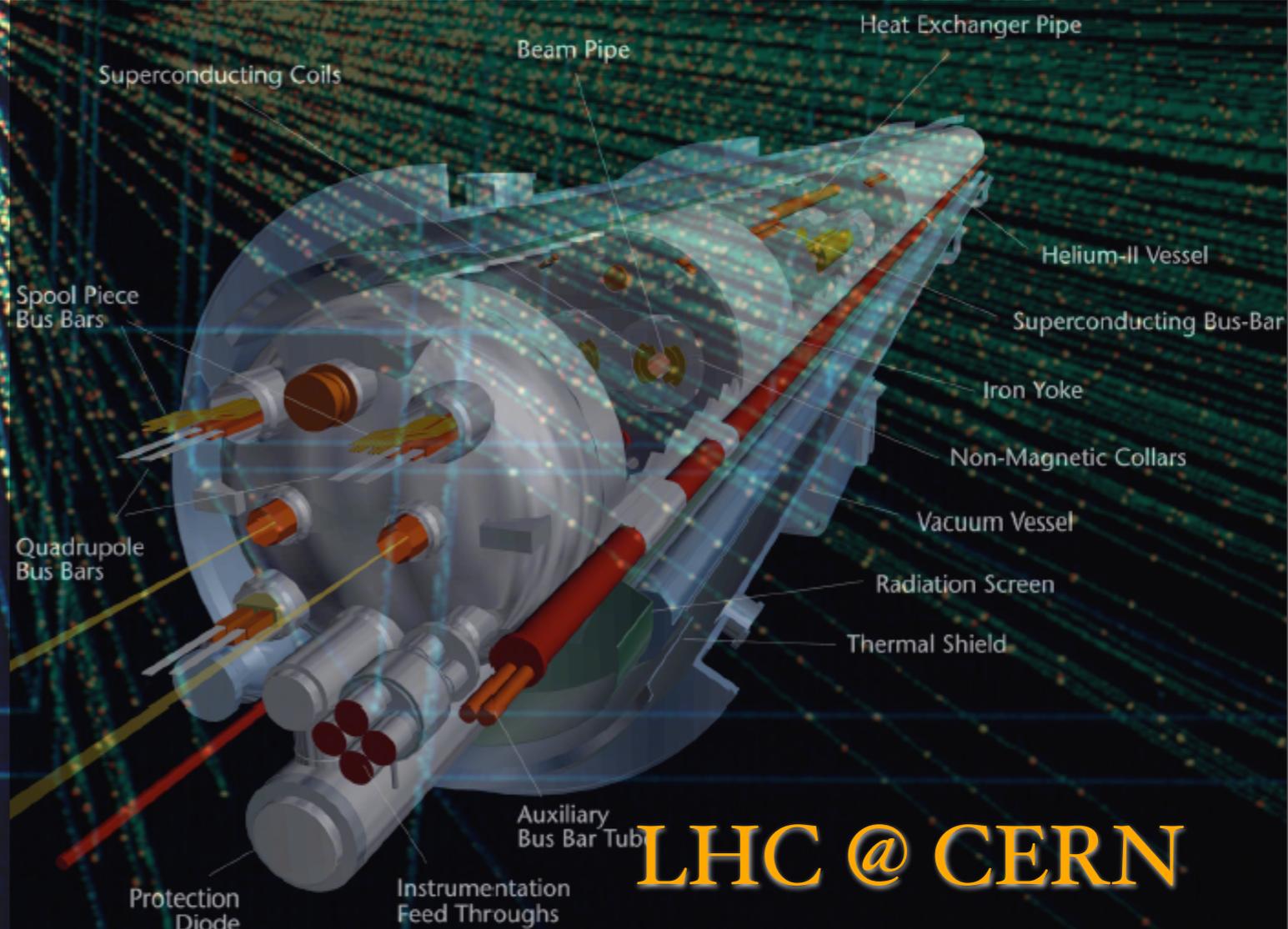
<http://pdg.web.cern.ch/pdg/particleadventure/index.html>

Existe-t-il d'autres formes de
matière ou d'énergie dans l'univers ?

WIMPS, particules
supersymétrique, Énergie du vide...

Atomes, Noyaux et Particules

Propriétés de la matière



LHC @ CERN

La gravitation: révélateur de la matière invisible

La gravitation: révélateur de la matière invisible

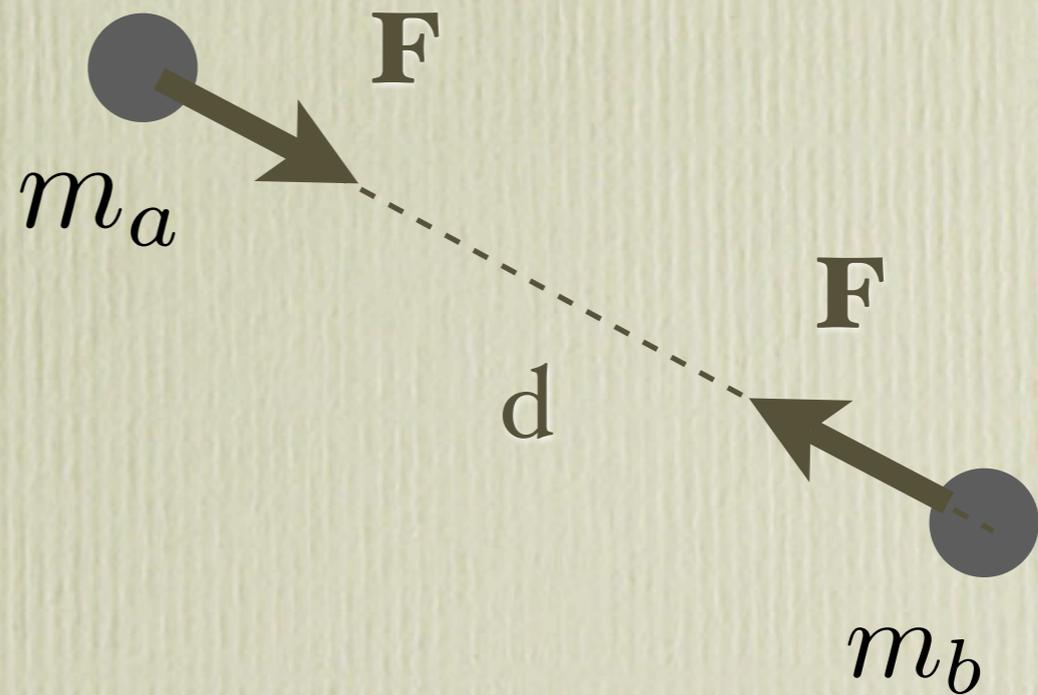


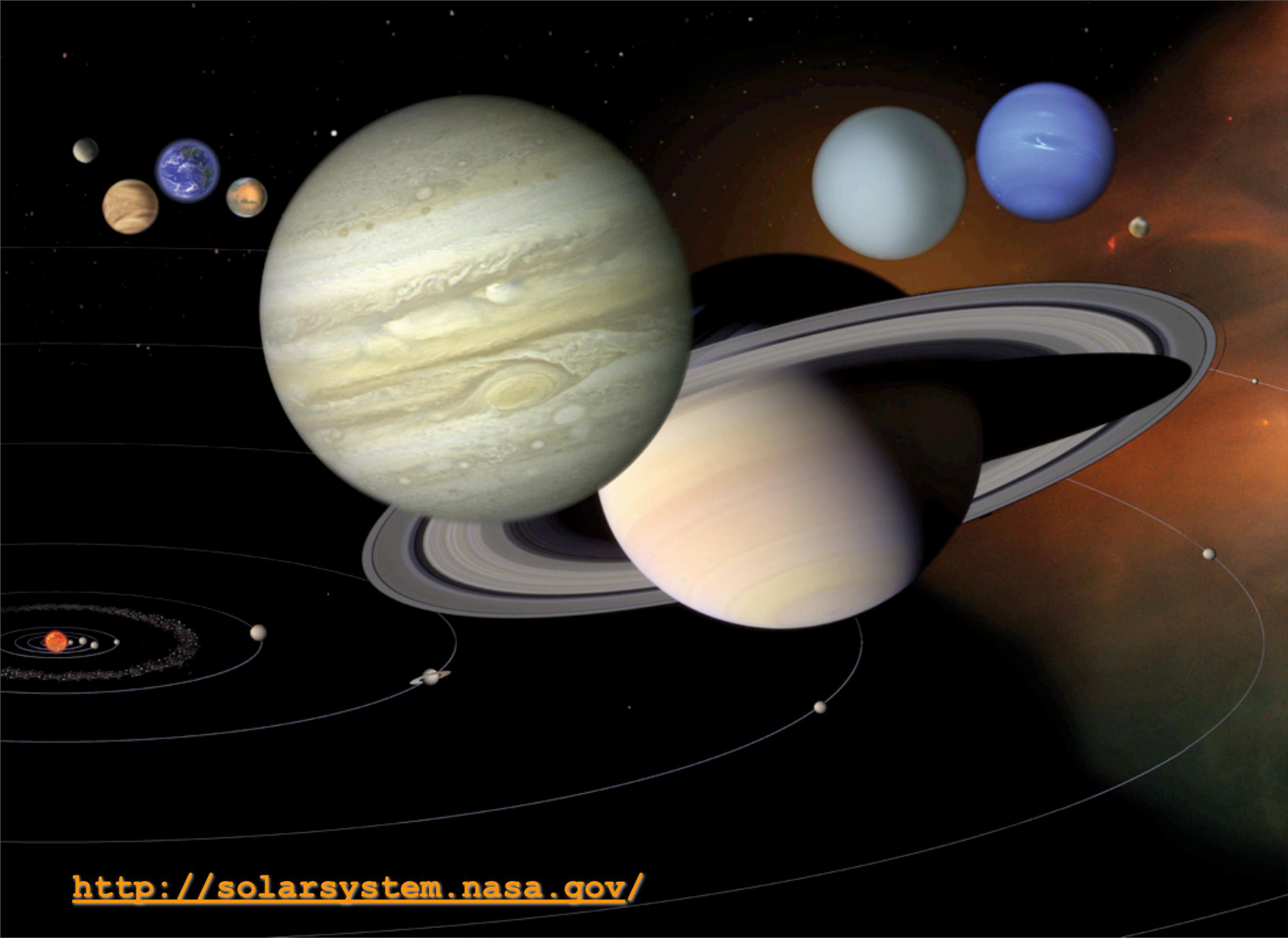
La gravitation: révélateur de la matière invisible



$$\mathbf{F} = G \frac{m_a m_b}{d^2} \vec{u}_{ab}$$

$$\Phi(r) = -G \frac{m}{r}$$





<http://solarsystem.nasa.gov/>



<http://solarsystem.nasa.gov/>

Urbain Le Verrier (1811-1877)
calcule les caractéristiques de Neptune à partir des
anomalies du mouvement d'Uranus



La matière noire dans notre Galaxie



M16, / Eagle Nébula - VLT-ISAAC (©ESO)
à 6500 AL, (champ: 9.1' -17 AL)
<http://www.eso.org/outreach/>

Notre Galaxie: la Voie Lactée



M16, / Eagle Nébula - VLT-ISAAC (©ESO)
à 6500 AL, (champ: 9.1' -17 AL)
<http://www.eso.org/outreach/>

Notre Galaxie: la Voie Lactée

- Étoiles (Hydrogène, Hélium)
- Gaz (Hydrogène, Hélium)
- Poussières (Éléments plus lourds)

M16, / Eagle Nébula - VLT-ISAAC (©ESO)

à 6500 AL, (champ: 9.1' -17 AL)

<http://www.eso.org/outreach/>



Photograph: Y. Beletsky

The Planet, the Galaxy and the Laser

ESO Press Photo 33a/07 (2 August 2007)





Galaxie spirale Messier83 - VLT-ISAAC (©ESO)
à ~ 15 millions AL (5-7 Mpc) - champ: 6.8'
<http://www.eso.org/outreach/>

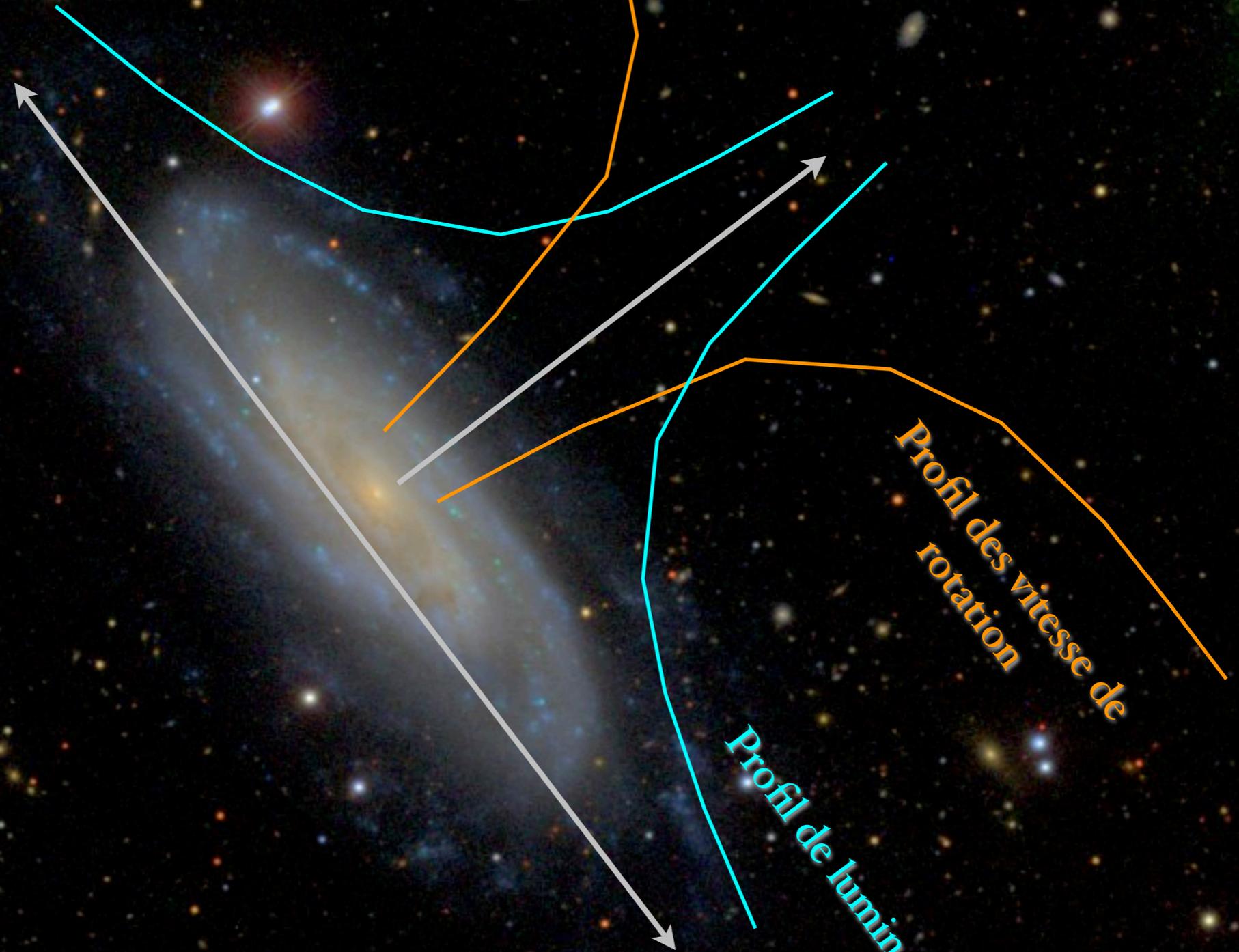


NGC 3198 (Image SDSS - gri, 4858-7706 A)
à ~ 45 millions AL (14-15 Mpc)
<http://ned.ipac.caltech.edu/>

Mesure de la vitesse de rotation des étoiles et du gaz

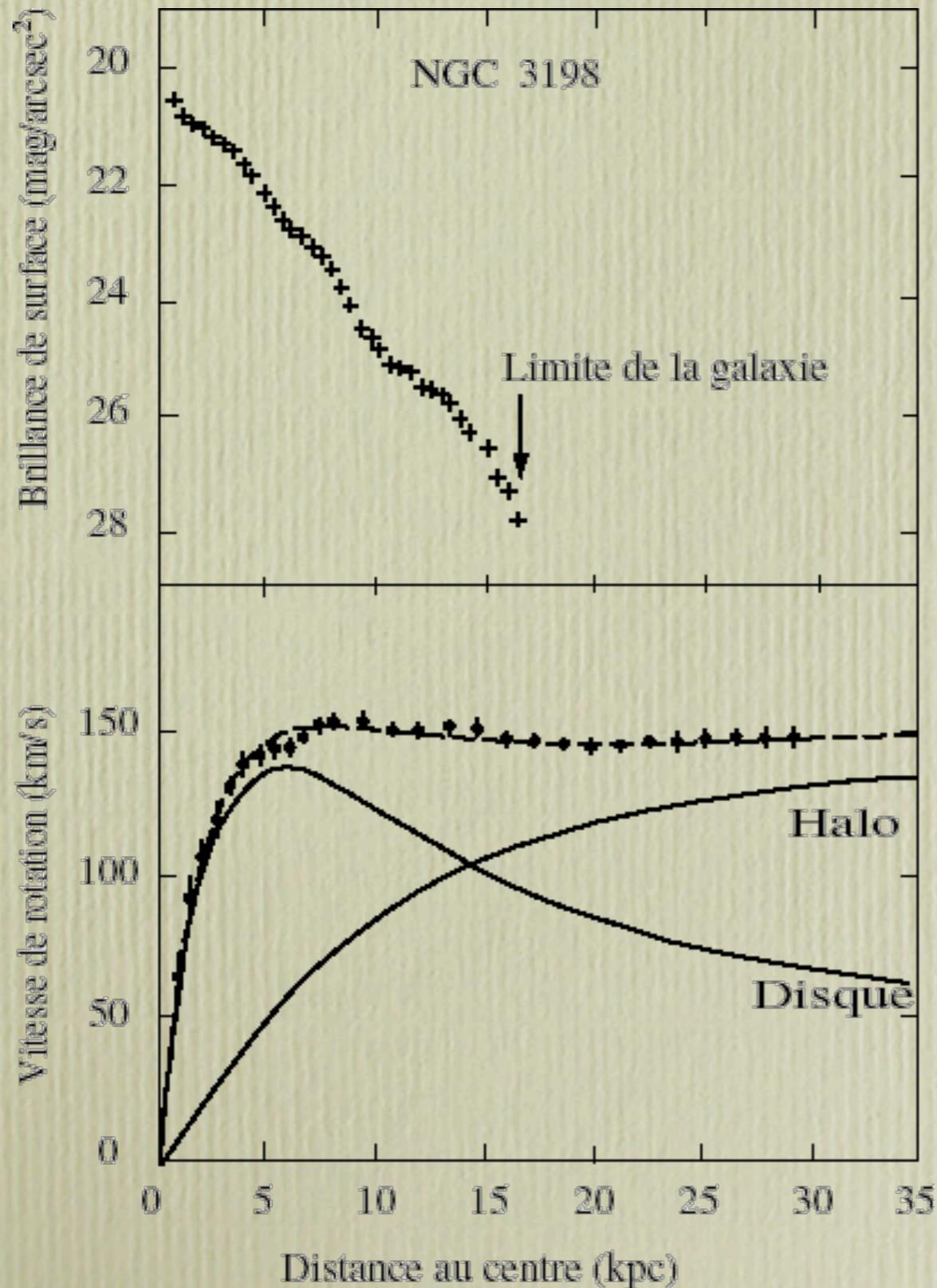
NGC 3198 (Image SDSS - gri, 4858-7706 A)
à ~ 45 millions AL (14-15 Mpc)
<http://ned.ipac.caltech.edu/>

Mesure de la vitesse de rotation des étoiles et du gaz



NGC 3198 (Image SDSS - gri, 4858-7706 A)
à ~ 45 millions AL (14-15 Mpc)
<http://ned.ipac.caltech.edu/>

Le halo sombre de la Galaxie



Profil de luminosité

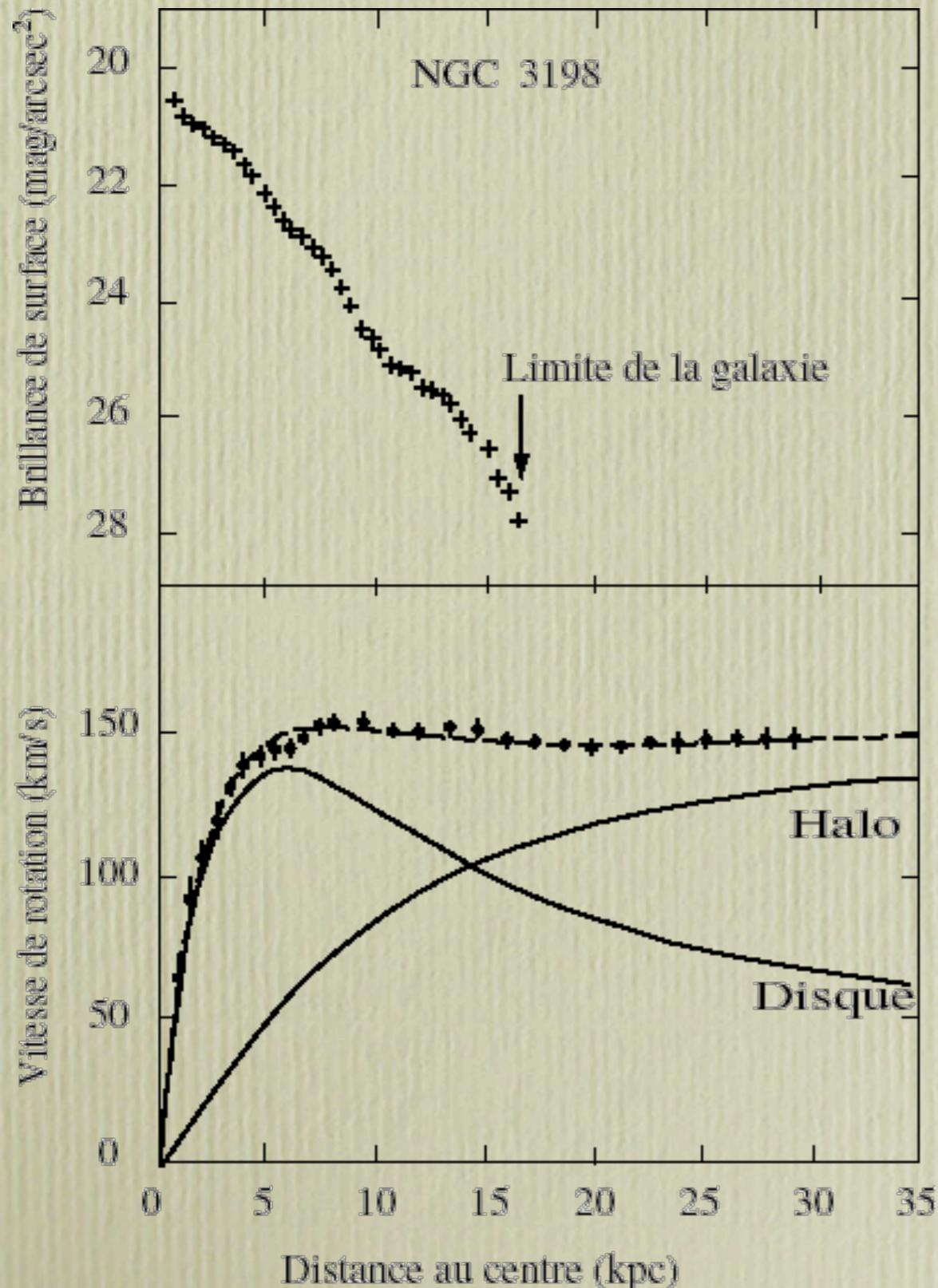
La masse lumineuse est concentrée au centre de la galaxie

Profil des vitesses de rotation

La vitesse reste constante loin du centre, au lieu de décroître

Masse concentrée M_c $v \propto \sqrt{\frac{M_c}{R}}$

Le halo sombre de la Galaxie



Profil de luminosité

La masse lumineuse est concentrée au centre de la galaxie

Profil des vitesses de rotation

La vitesse reste constante loin du centre, au lieu de décroître

Masse concentrée M_c $v \propto \sqrt{\frac{M_c}{R}}$

➡ Halo de matière sombre
N'émet, ni n'absorbe de lumière.
Interagit gravitationnellement

Quelle forme pour la matière sombre ?

◆ Matière sous forme diffuse

- Gaz moléculaire froid, avec une structure fractale
- Nouvelle forme exotique de matière (WIMPS)

◆ Objets compacts

- Cadavres stellaires et trous noirs
- Naines brunes (étoiles avortées)

Quelle forme pour la matière sombre ?

◆ Matière sous forme diffuse

- Gaz moléculaire froid, avec une structure fractale
- Nouvelle forme exotique de matière (WIMPS)

◆ Objets compacts

- Cadavres stellaires et trous noirs
- Naines brunes (étoiles avortées)



Quelle forme pour la matière sombre ?

◆ Matière sous forme diffuse

- Gaz moléculaire froid, avec une structure fractale
- Nouvelle forme exotique de matière (WIMPS)

◆ Objets compacts

- Cadavres stellaires et trous noirs
- Naines brunes (étoiles avortées)

Utilisation de l'effet de micro-lentille gravitationnelle pour la recherche d'objets compacts du halo (MACHO)

Paczynski (1986)



Lentille gravitationnelle



Abell 1689- STSCI + Chandra

à 2300×10^6 AL (670 Mpc , $z \sim 0.16$), (champ: $3.2' \sim 2$ Mpc)

<http://chandra.harvard.edu/photo/2008/a1689/>

Un amas de galaxies (A1689)

Abell 1689- STSCI + Chandra

à 2300×10^6 AL (670 Mpc , $z \sim 0.16$), (champ: $3.2' \sim 2$ Mpc)

<http://chandra.harvard.edu/photo/2008/a1689/>

Un amas de galaxies (A1689)

- Centaines ou milliers de galaxies
- Mass de $10^{14} - 10^{15} M_{\text{sol}}$
- Gaz chaud inter galactique , 10-100 millions de degrés, émetteur de rayons X

Abell 1689- STSCI + Chandra

à 2300 10^6 AL (670 Mpc , $z \sim 0.16$), (champ: 3.2' \sim 2 Mpc)

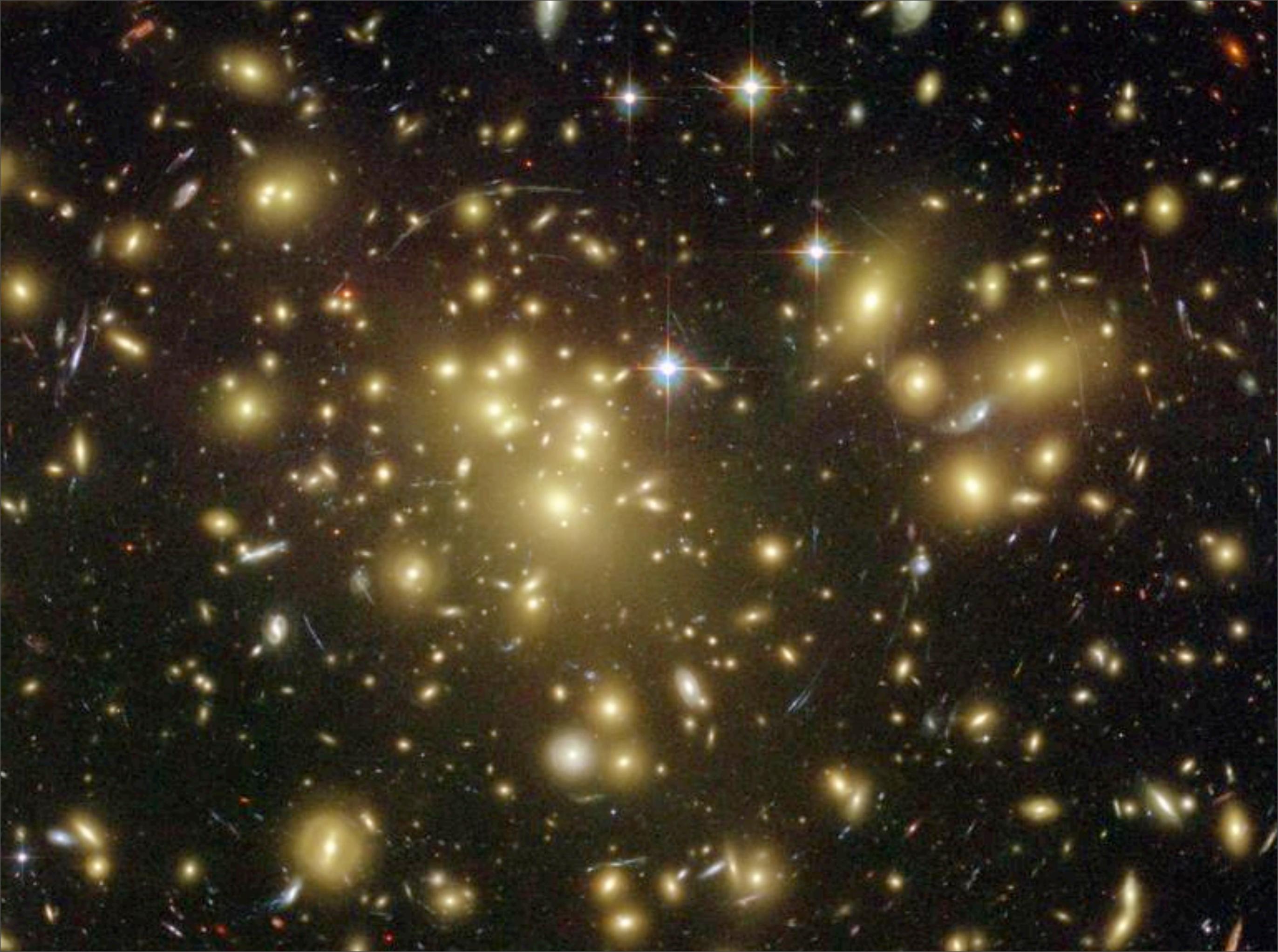
<http://chandra.harvard.edu/photo/2008/a1689/>

Effet de lentille par les amas

The image shows a vast field of galaxies, many of which are distorted and magnified, illustrating the gravitational lensing effect of a galaxy cluster. The galaxies are primarily yellow and white, with some blue and red ones scattered throughout. The background is dark, making the galaxies stand out. The overall appearance is that of a rich, multi-colored galaxy cluster.

Abell 1689- HST/STScI

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2003/01/image/a/>





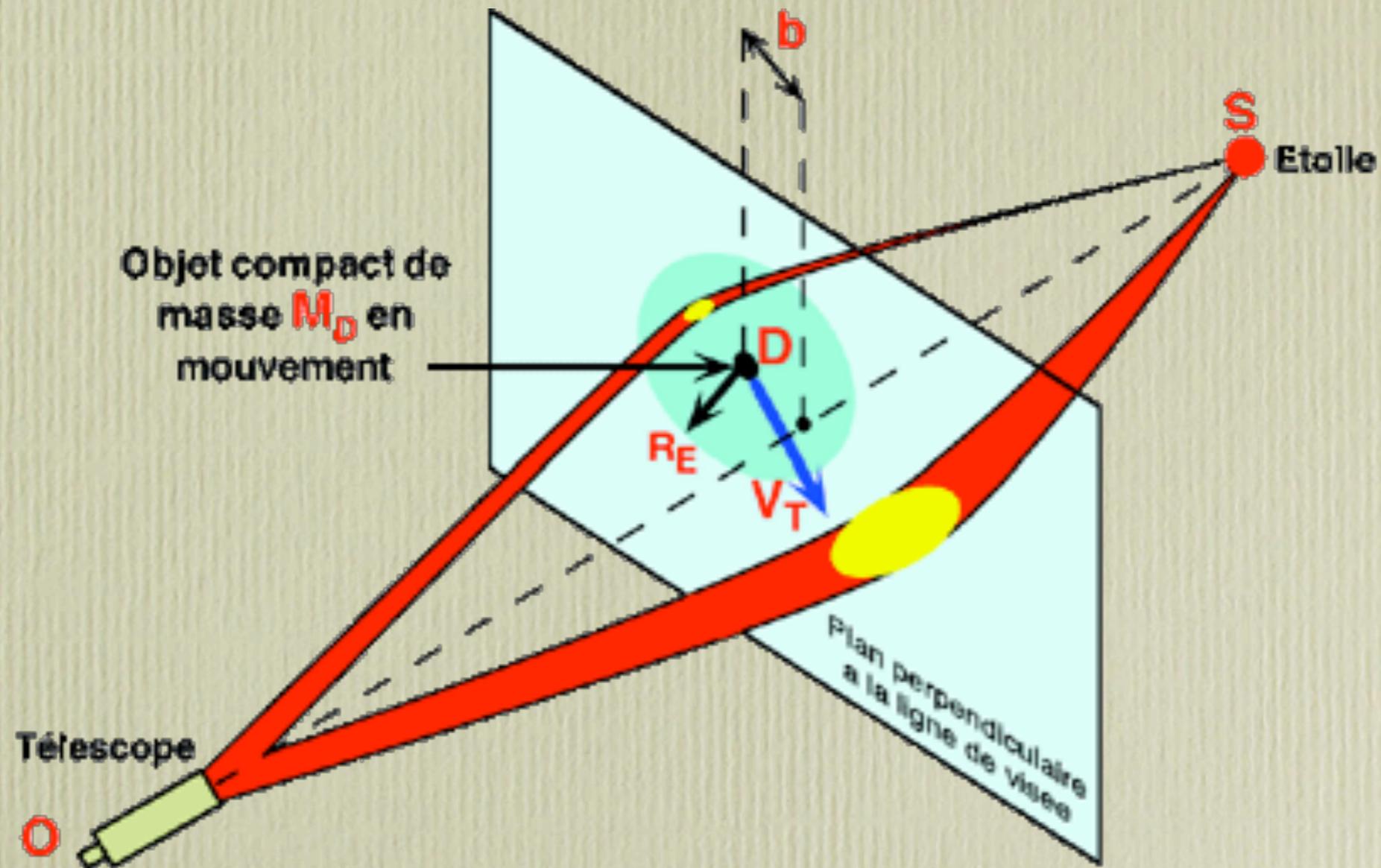
Abell 1689- STSCI /HST

- Effet de lentille de l'amas sur les galaxies en arrière plan Mesure
- Distortion d'images, magnification et arcs gravitationnels
- Mesure de la masse dynamique (en interaction gravitationnelle)

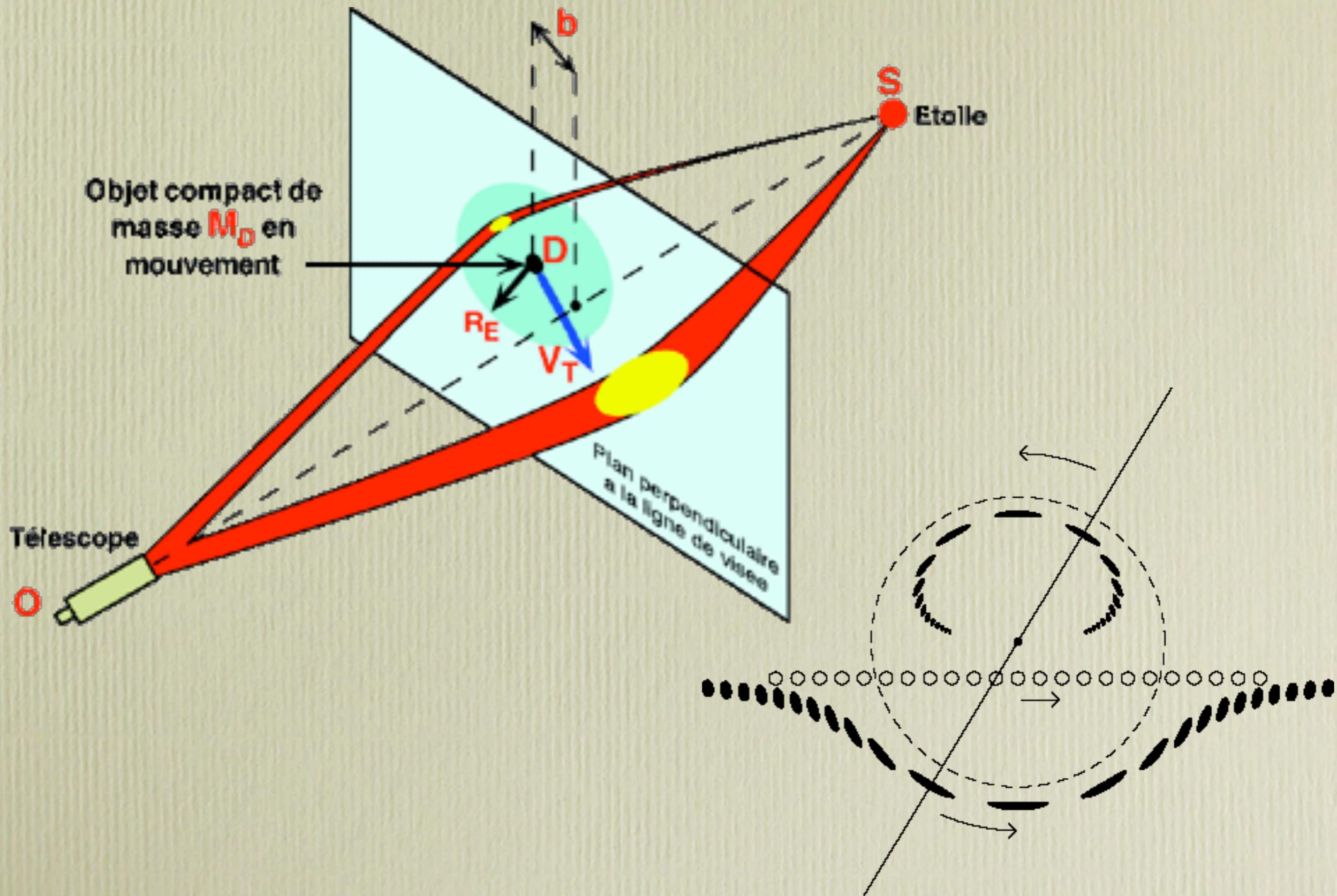


Abell 1689- STSCI /HST

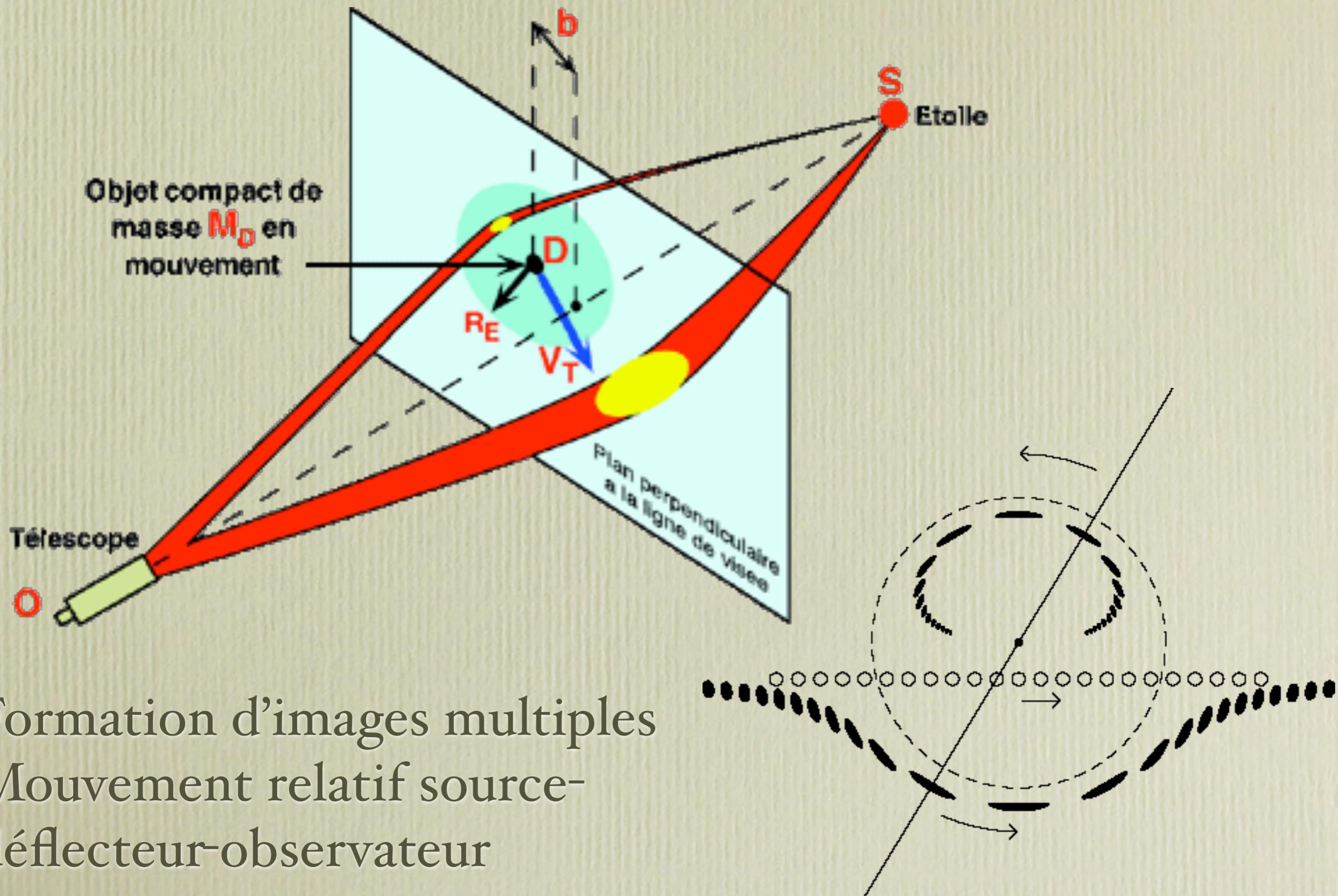
Effet de micro-lentille

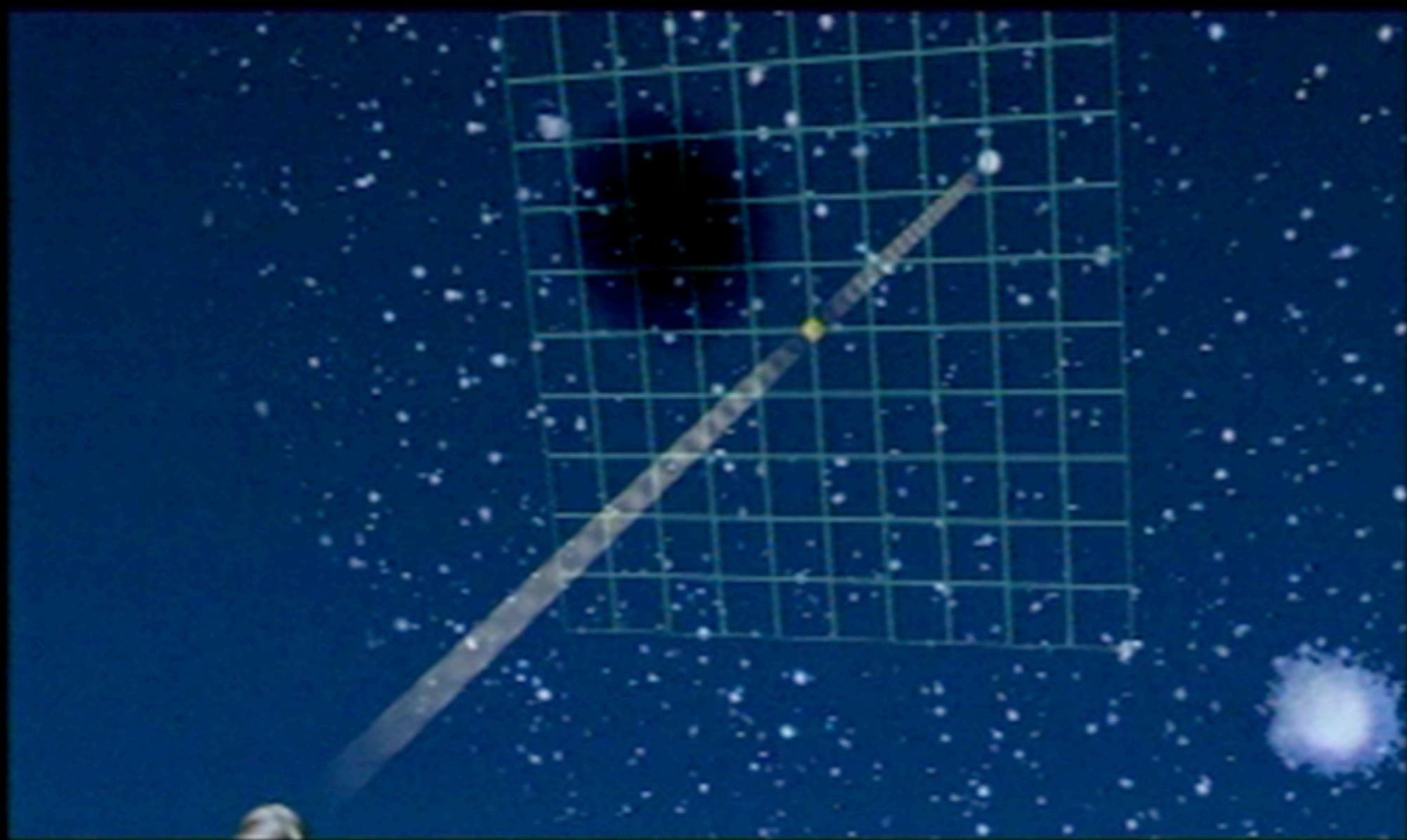


Effet de micro-lentille

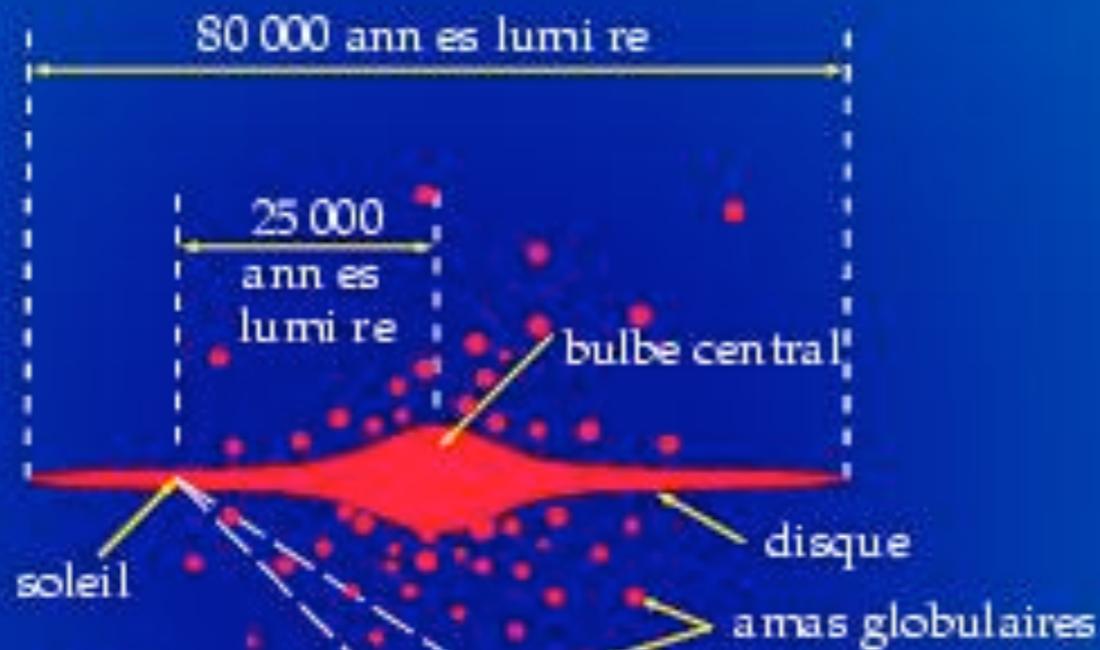


Effet de micro-lentille

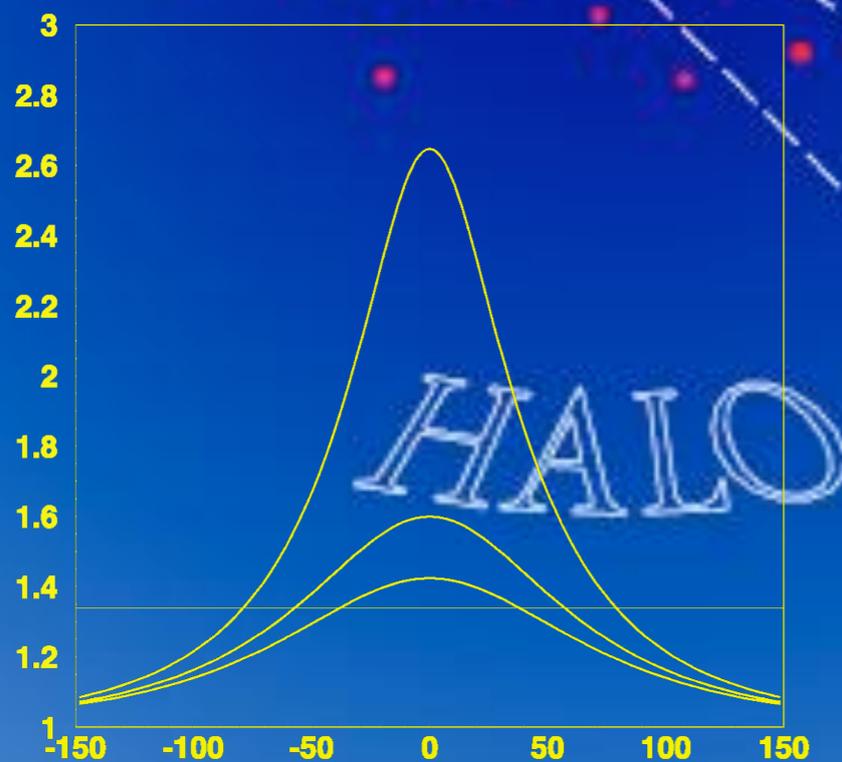




Recherche de MACHO's dans le halo



- Augmentation apparente de luminosité des étoiles du LMC-SMC
- Phénomène transitoire
- Se produit avec une très faible probabilité ($< 1/1000\ 000$)
- Il faut surveiller plusieurs millions d'étoiles dans les nuages de Magellan



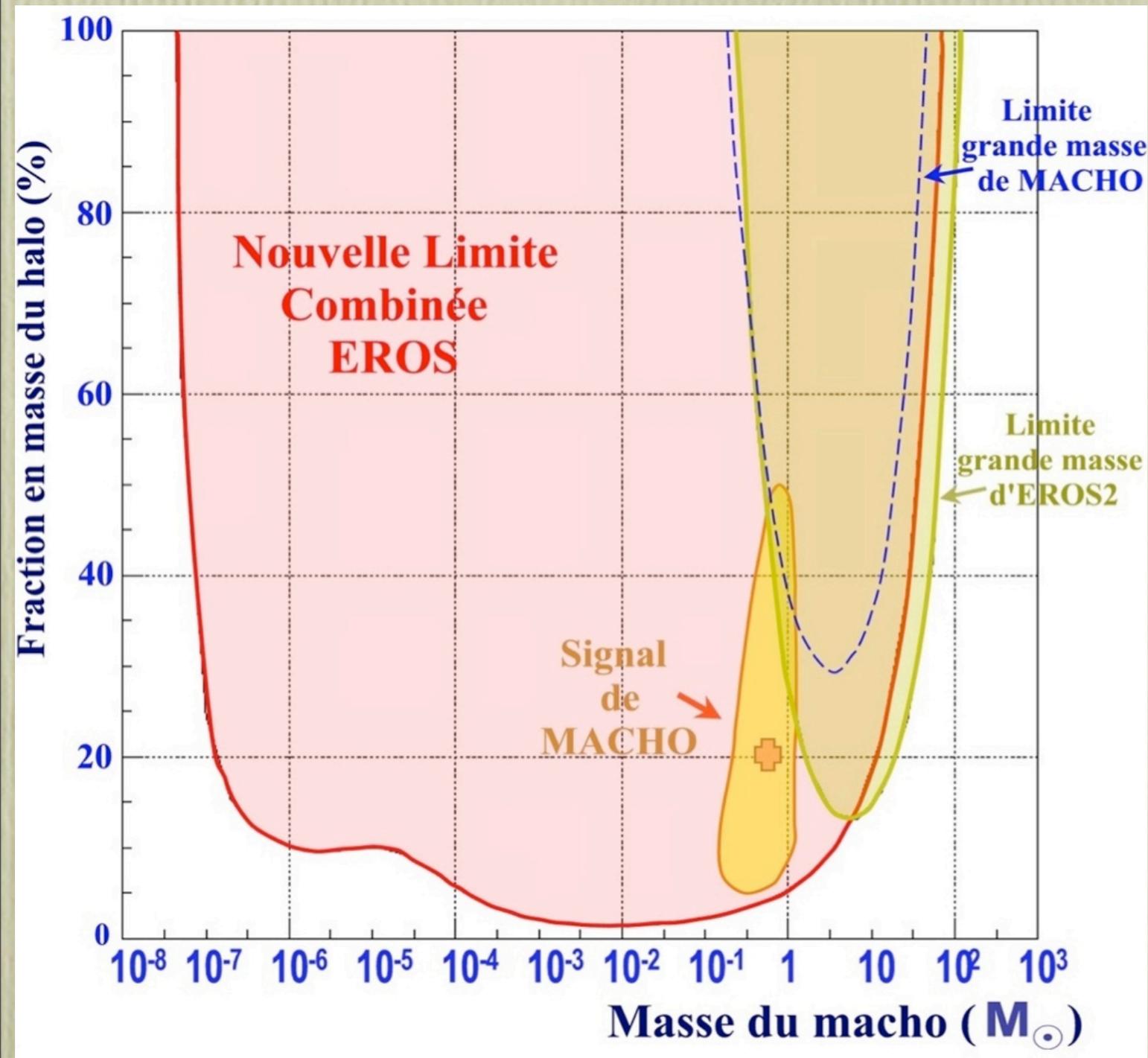
170 000 ann es lumi re

205 000 ann es lumi re

Grand Nuage de Magellan



Nature de la matière sombre ?

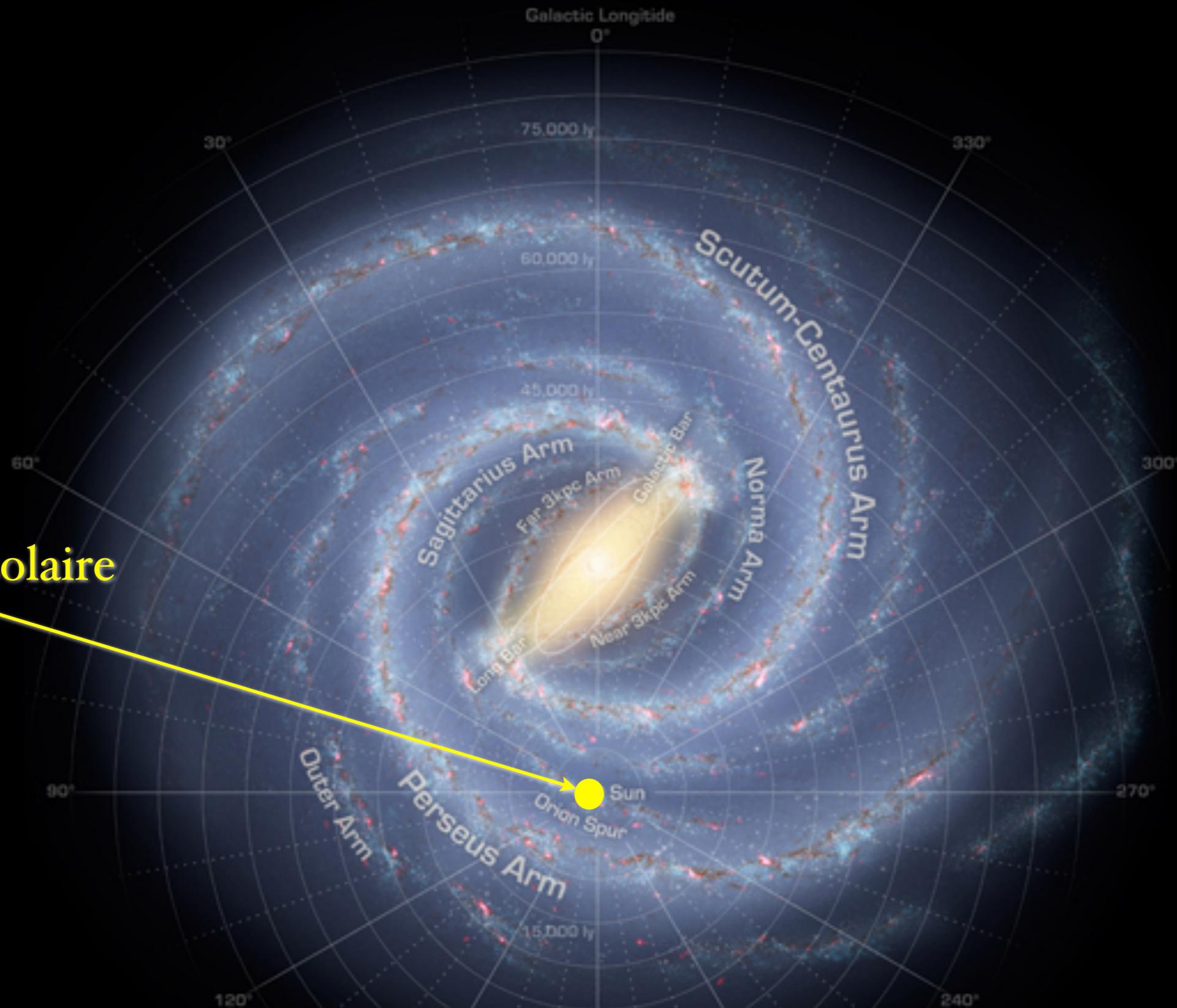
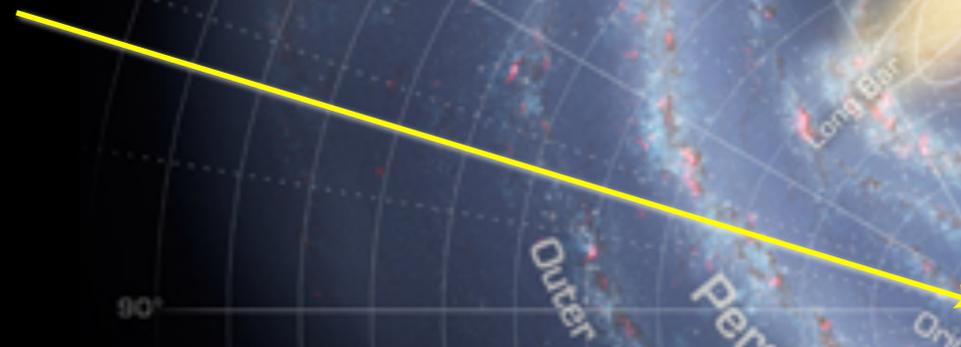


Pas (assez) d'objets compacts observés dans le halo (effet de micro-lentille)

Pas (encore) d'indication de présence de WIMPS dans le halo

L'enquête continue ...

Systeme solaire



La Voie Lactée (vue d'artiste)
<http://solarsystem.nasa.gov/multimedia>

Le Centre Galactique

40x20 deg, autour de $l=10, b=0$

40 deg



IR

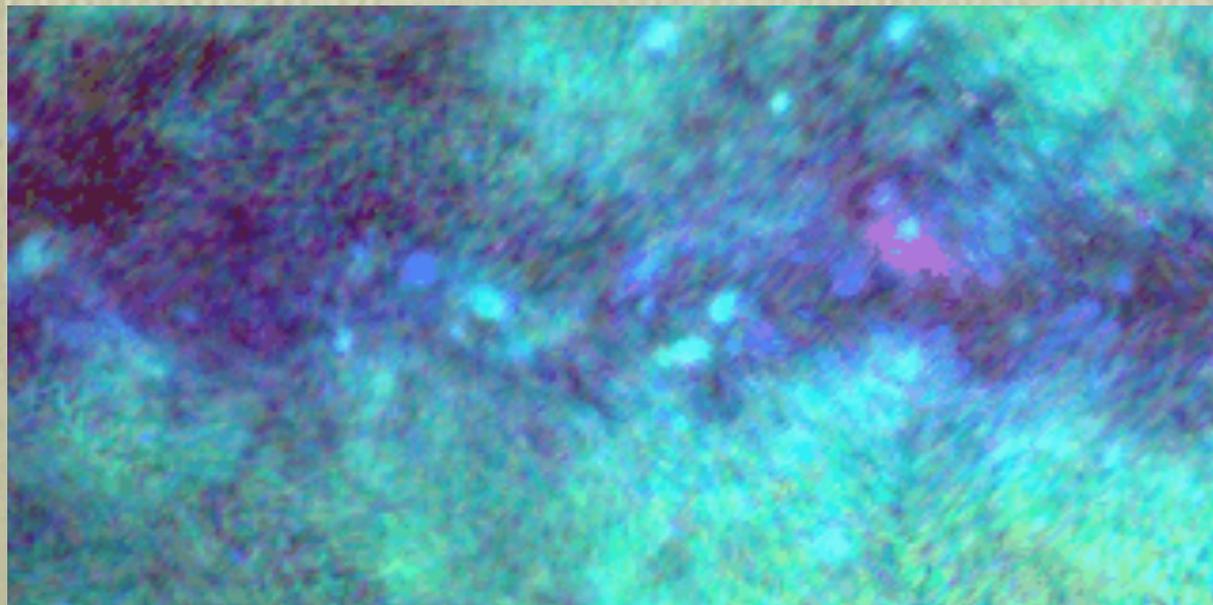
40 deg



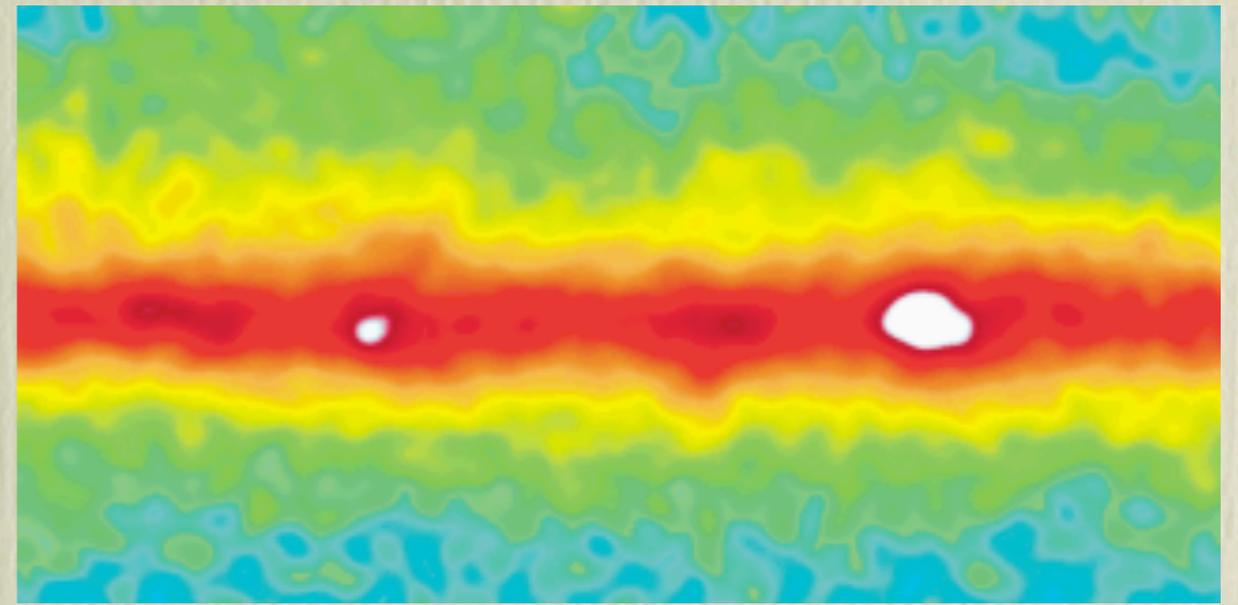
Optique

20 deg

20 deg



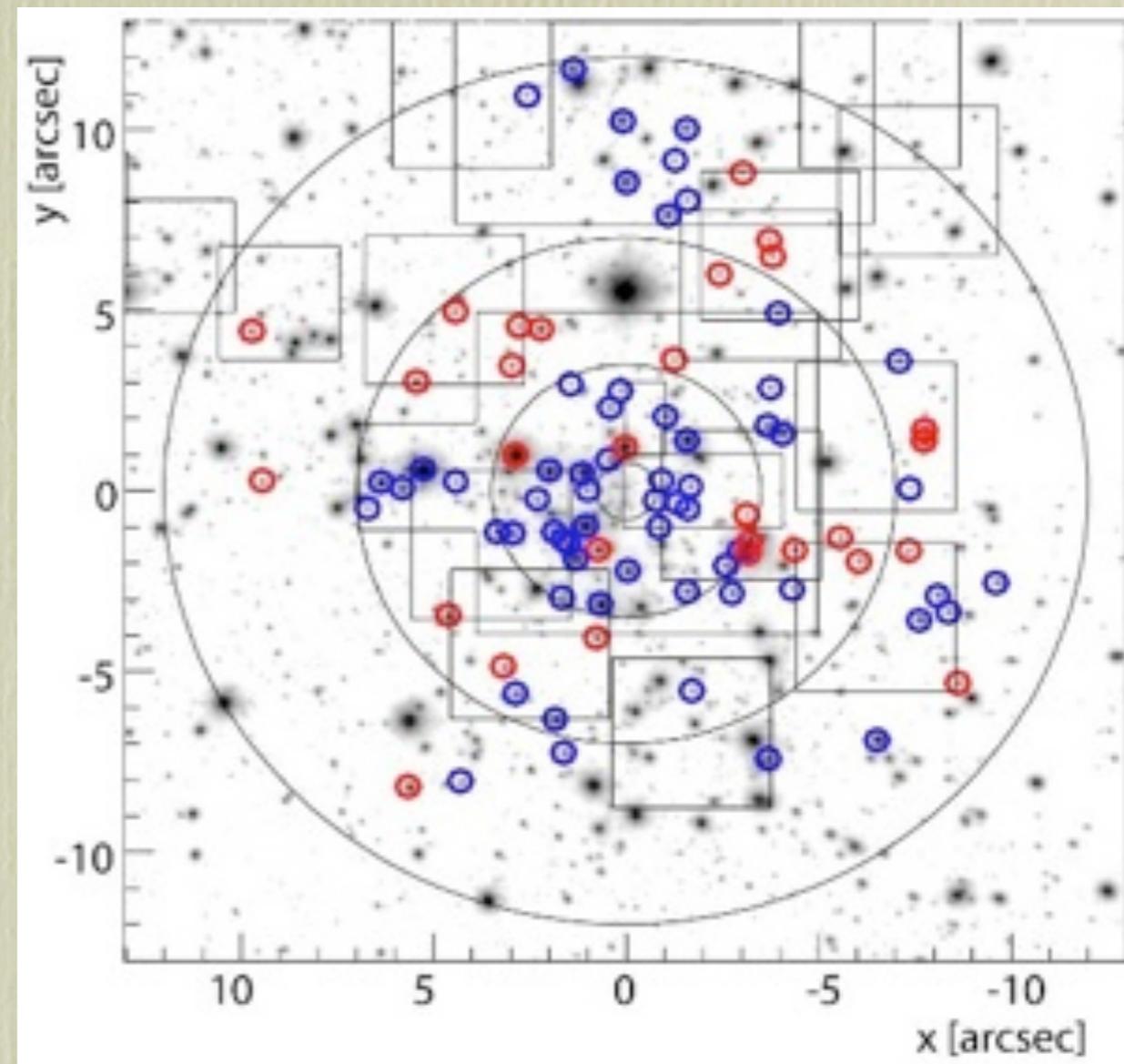
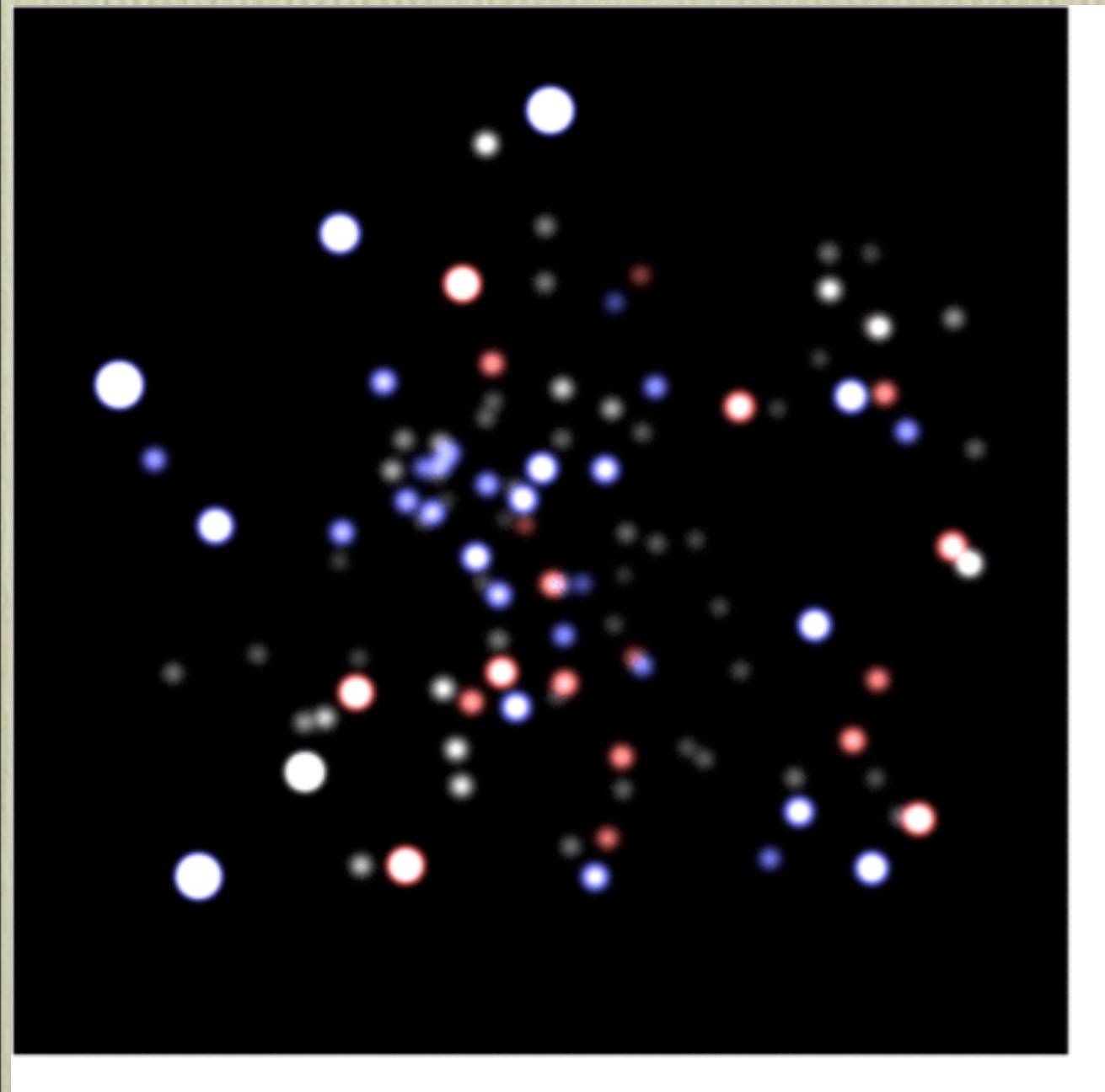
Rayons X (ROSAT)



Gamma (EGRET/CGRO)

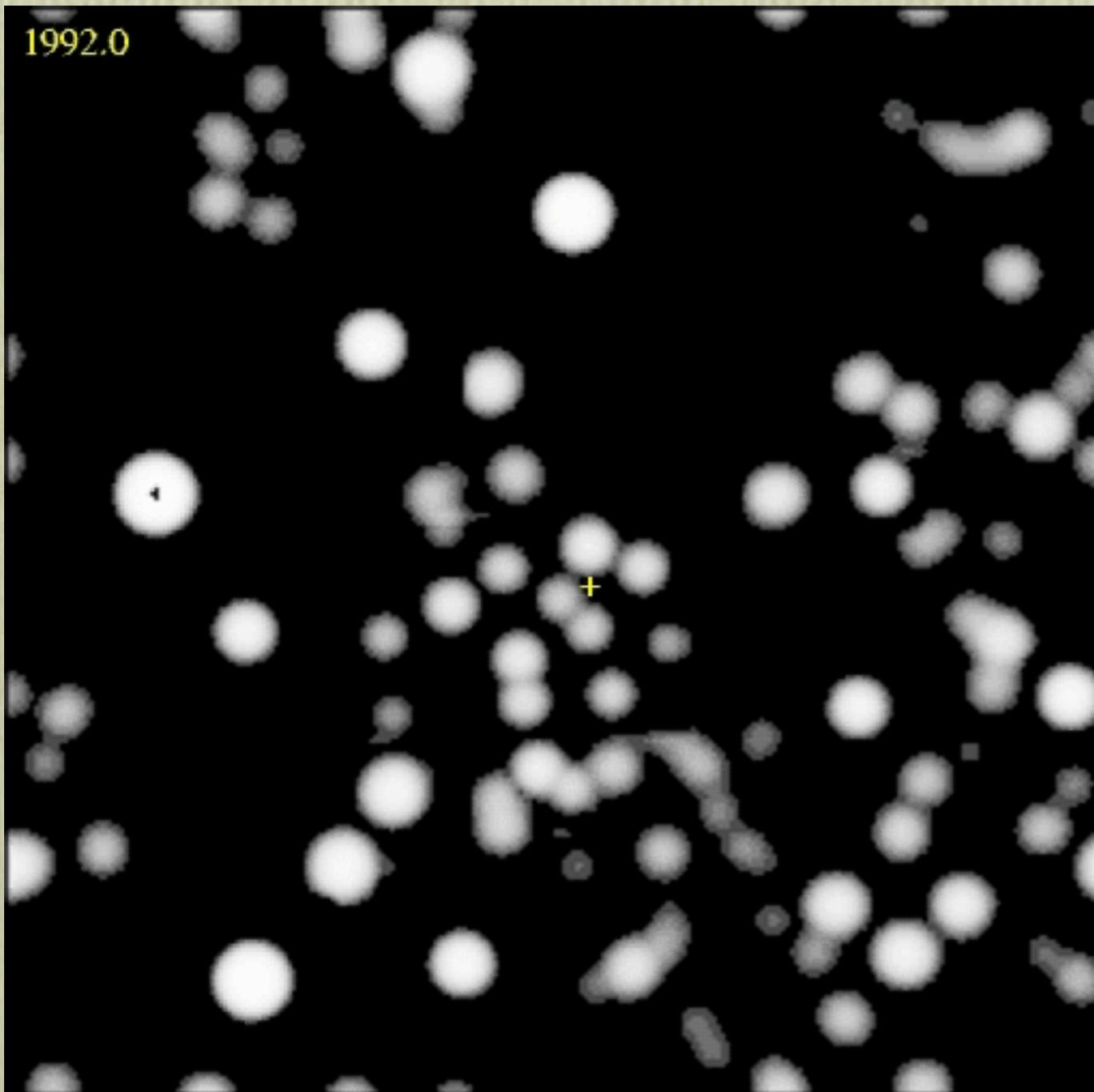
Le Centre Galactique

La danse des étoiles



Observation de la rotation des étoiles
autour du centre Galactique de 1992 à 2008

Un trou noir au Centre de la Galaxie ?



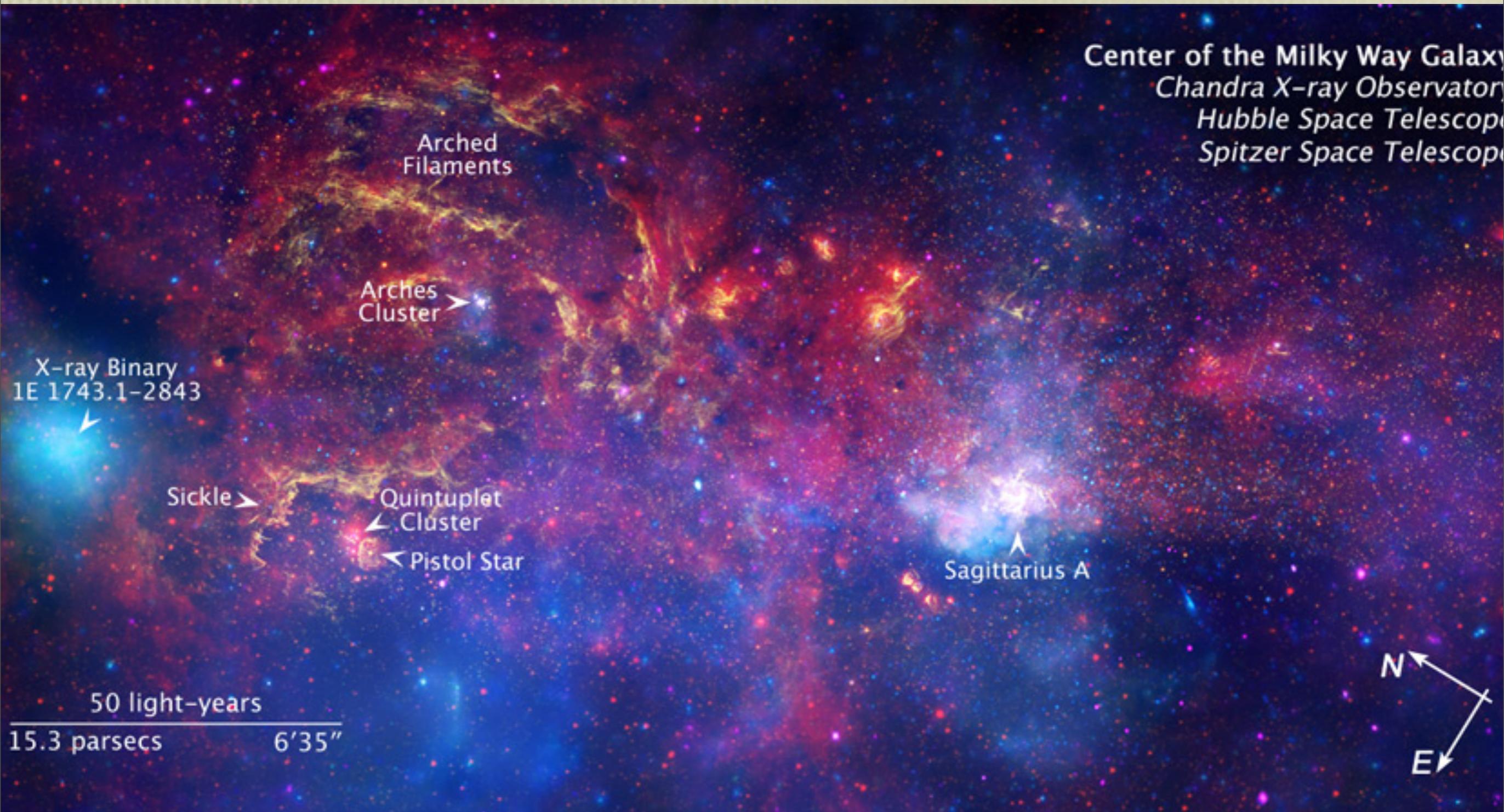
- Grande vitesse de rotation des étoiles, jusqu'à 1500 km/s, autour du Centre Galactique
- Objet compact SgrA (Observations Radio VLBI)
- Indication de présence d'un trou noir massif (2,6 millions fois la masse du soleil)

Rayon de Schwarzschild $R_s = \frac{2GM}{c^2}$

$$R_s(\odot) \simeq 3\text{km}$$

Le centre galactique

Image composite HST, Spitzer, Chandra



La Cosmologie

Cosmologie n.f. Science qui étudie la structure, l'origine et l'évolution de l'Univers considéré dans son ensemble (Larousse)

Comment mesurer la densité de matière
dans l'Univers à grande échelle ?

Comment mesurer la densité de matière dans l'Univers à grande échelle ?

- Mesurer la dynamique gravitationnelle de l'univers à grande échelle
- Quelle est la topologie spatio-temporelle de l'Univers ?
- Comment évolue la trame de l'espace-temps sur des durées comparables à l'âge de l'Univers (quelques milliards d'années) ?
- Les galaxies comme traceurs ...

Comment mesurer la densité de matière dans l'Univers à grande échelle ?



Image profonde du ciel par le HST
(Hubble Space Telescope)
De nombreuses galaxies sont visibles
<http://hubblesite.org/>

Un univers en expansion ...

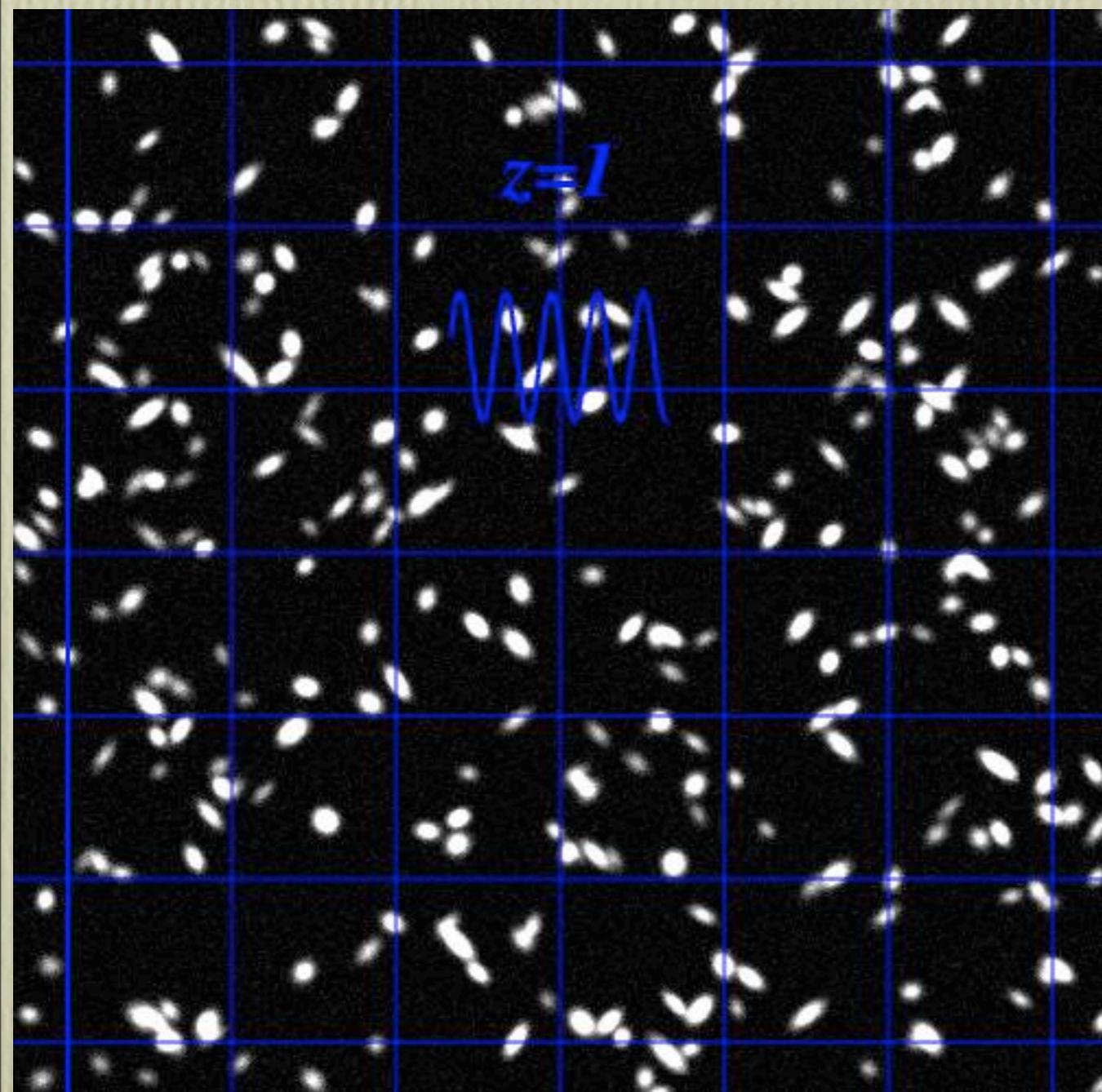
- ◆ Univers homogène et isotrope à grande échelle, avec une dynamique contrôlée par la gravité
- ◆ Les équations d'Einstein relient la courbure de l'espace aux densités de matière et d'énergie
- ◆ L'équation de Friedmann relie le taux d'expansion à la densité totale de matière-énergie
- ◆ Le décalage vers le rouge z (redshift) correspond à l'évolution du facteur d'échelle

$$z = R(t_o) / R(t_e) = R(t_r) / R(t_e)$$

$$z = \Delta\lambda / \lambda = \lambda_r / \lambda_e - 1$$

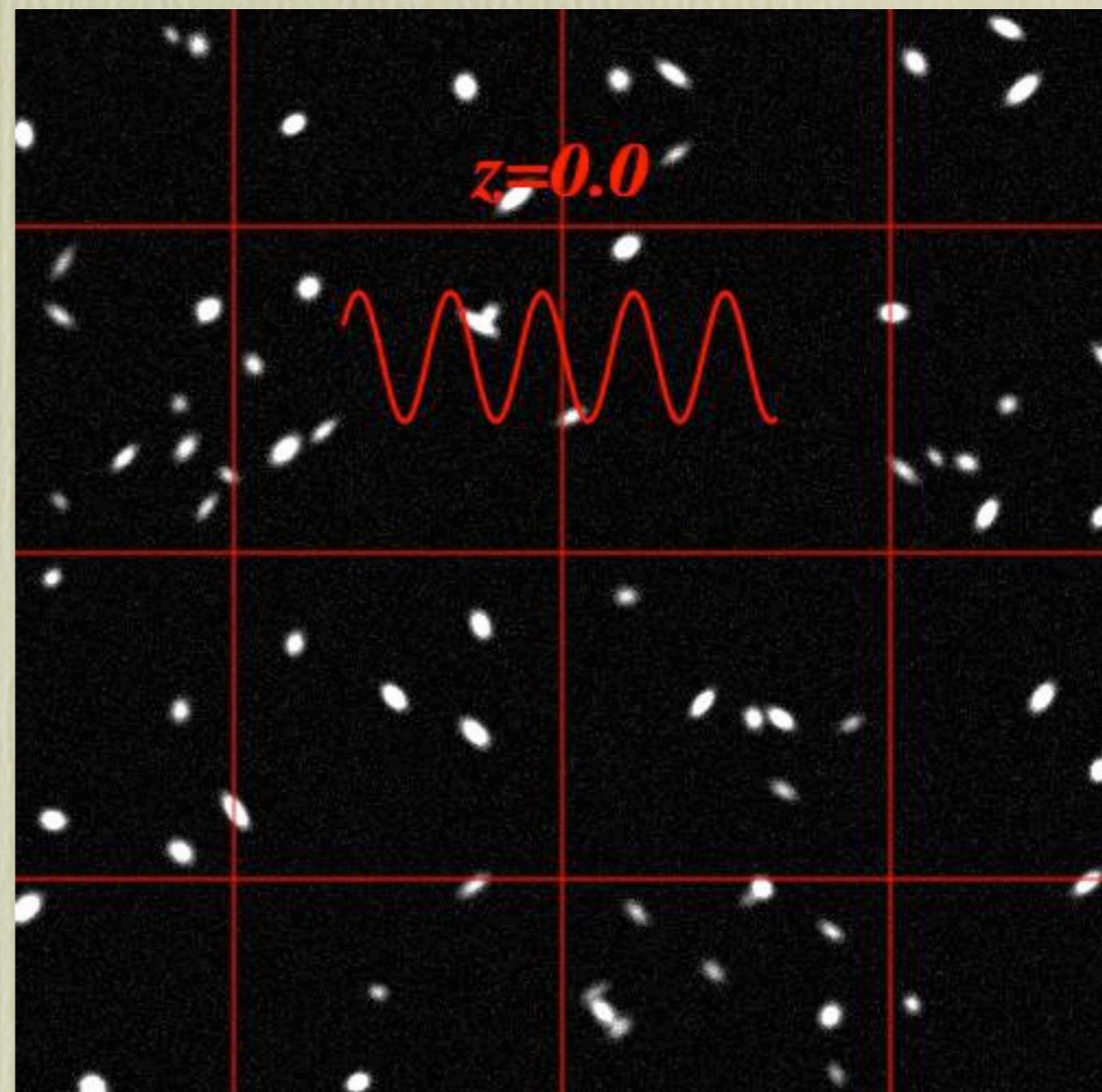
L'expansion et le décalage vers le rouge

Vue de l'univers à $z=1$ et à $z=0$



L_{km}

$z=1$ (-8 milliards années)



L_{km}

Aujourd'hui $z=0$

Arpentage de l'Univers

mesure de $d = f(z)$

- ◆ Le décalage vers le rouge est mesuré avec les raies d'émission ou d'absorption (atomique, moléculaire) des objets (galaxies...)
- ◆ On peut estimer les distances à l'aide de chandelles standard
 - On mesure la luminosité apparente d'un objet de luminosité absolue connue
 - Cette luminosité apparente décroît comme le carré de la distance de l'objet

Mesure des distances

Chandelle
standard



D_1

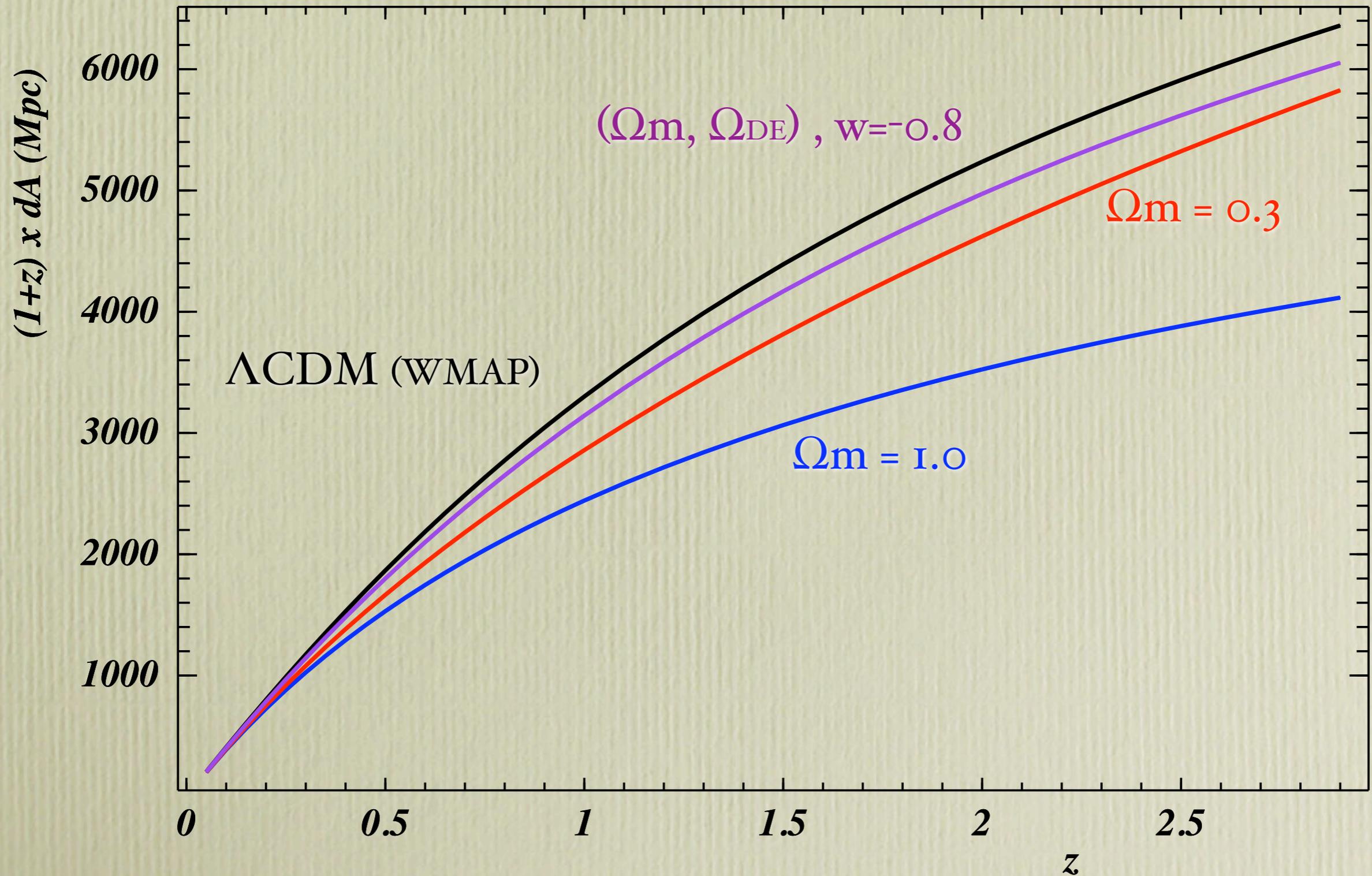
D_2

Règle
standard



Distance de diamètre angulaire $d_A(z)$

$(1+z) \times d_A(z)$



Les supernovae

Restes d'une SN observée en 1054

- II AL (3.4 pc)



Nébuleuse du Crabe (©STScI)

à 6500 AL, 2 kpc (champ: 9.1' -17 AL)

<http://www.spacetelescope.org/news/heic0515/>

Supernovae: les phares de l'Univers

- ◆ Véritables feux d'artifice cosmiques, les SN sont des explosions d'étoiles en fin de vie
- ◆ SNIa : explosion thermonucléaire d'une naine blanche C-O à la masse de Chandrasekhar ($1.4 M_{\odot}$)
- ◆ Événements rares (~ 1 SN / siècle / galaxie (MW))
- ◆ Aussi lumineuses que leurs galaxies hôtes, les SN sont visibles à des distances cosmologiques pendant quelques jours

Exemples de supernovae



SN1987A dans LMC



SN1994D (observée avec le HST)

Exemples de supernovae

SN observée par les
chinois en 1054
nébuleuse du crabe
dans la voie lactée



SN1987A dans LMC



SN1994D (observée avec le HST)



The Spiral Galaxy NGC 5584 and SN 2007af

ESO Press Photo 16/07 (27 March 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



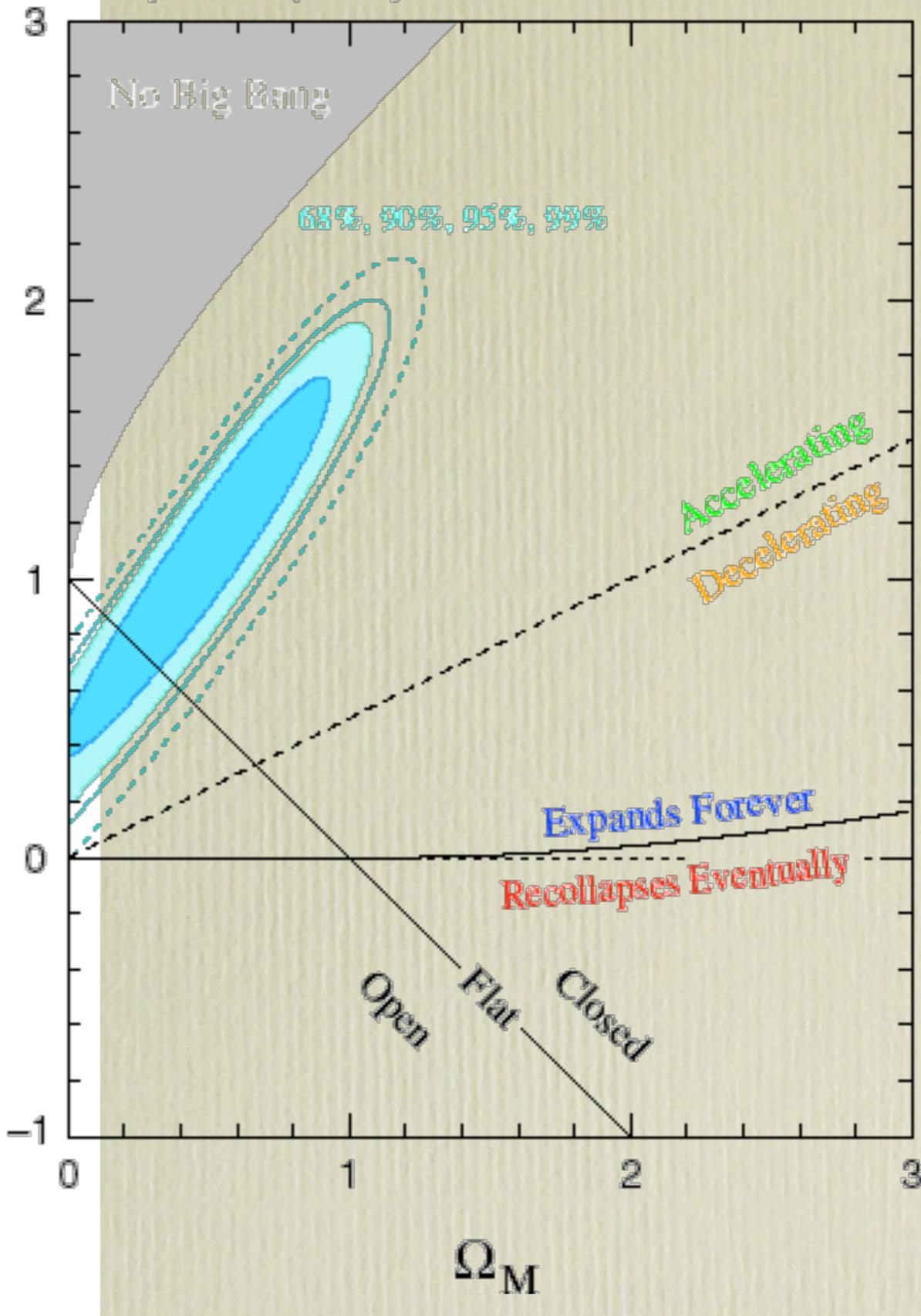
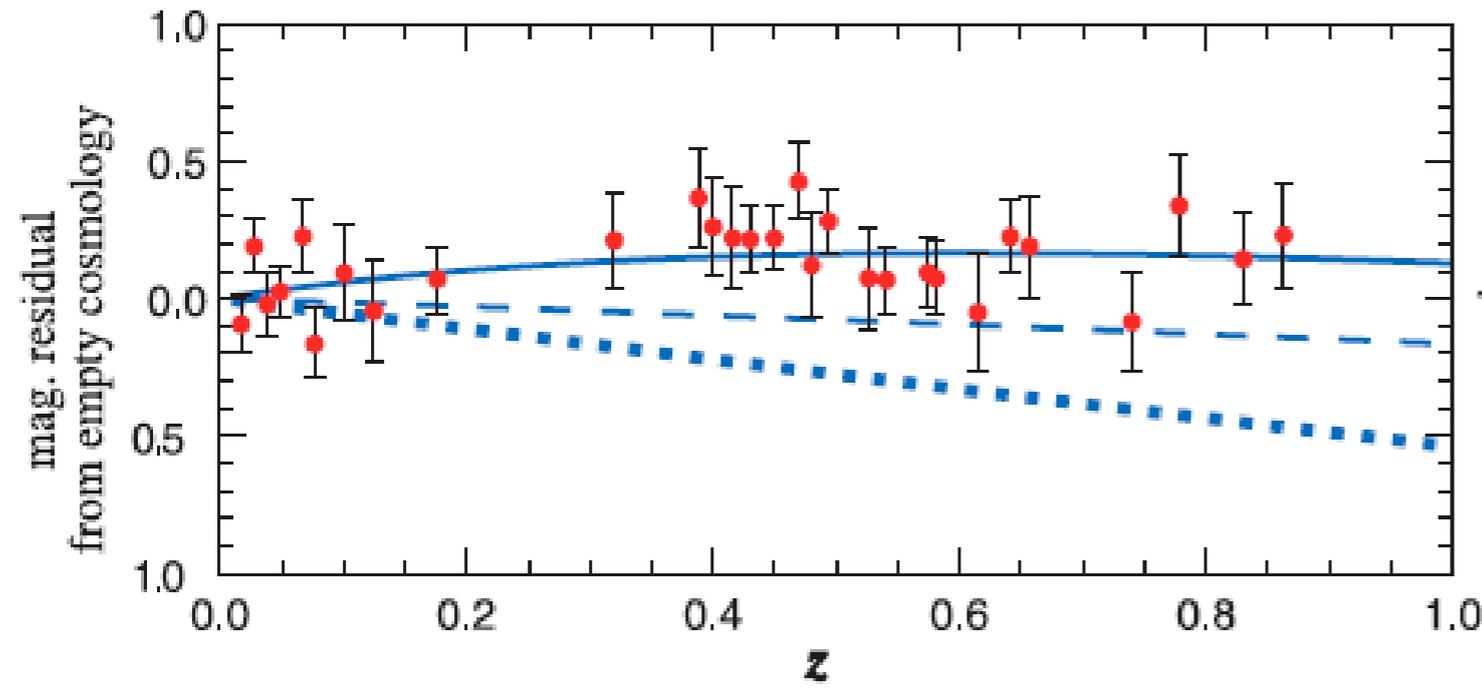
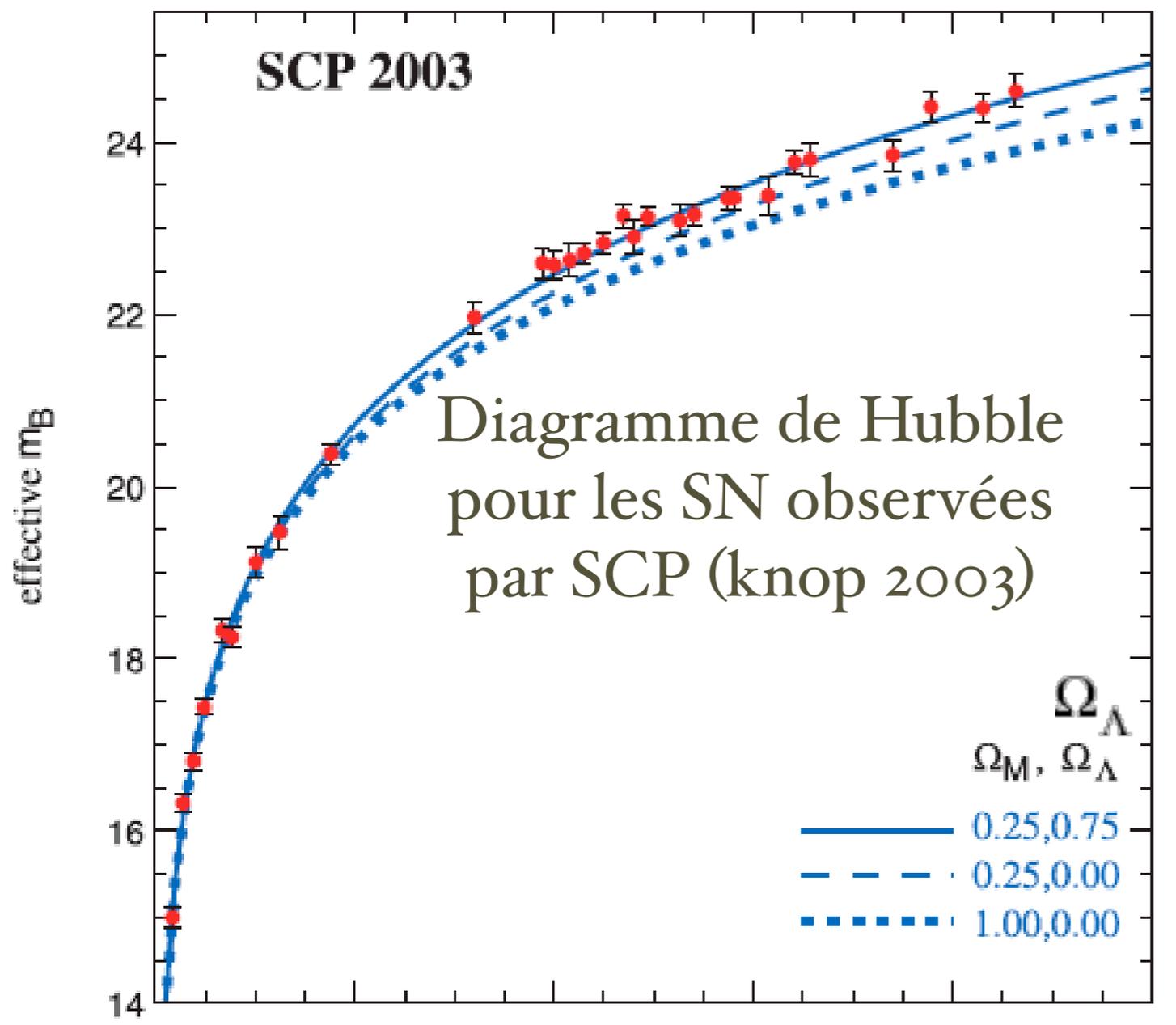
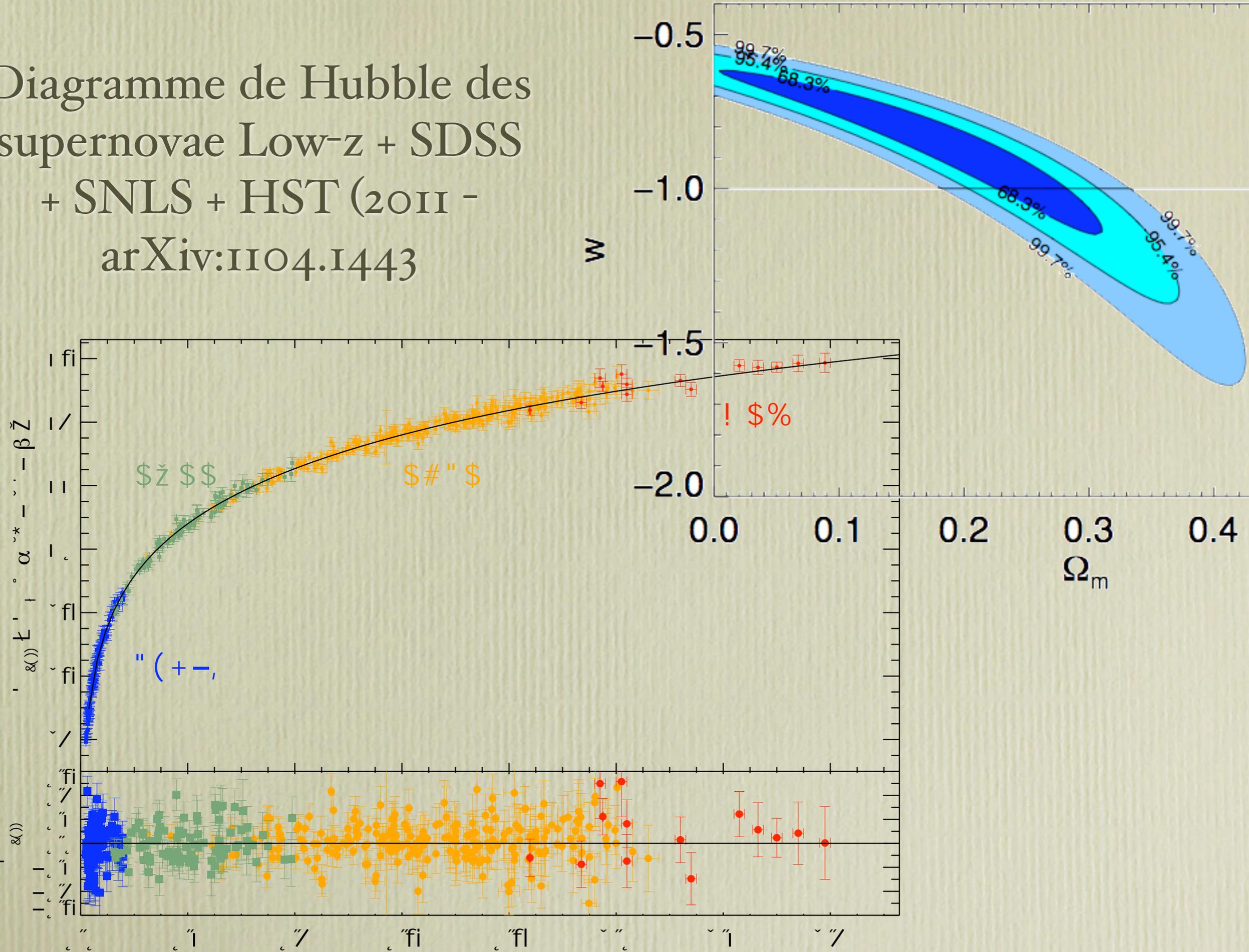


Diagramme de Hubble des
 supernovae Low-z + SDSS
 + SNLS + HST (2011 -
 arXiv:1104.1443





The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy:
Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian
National University

Brian P. Schmidt



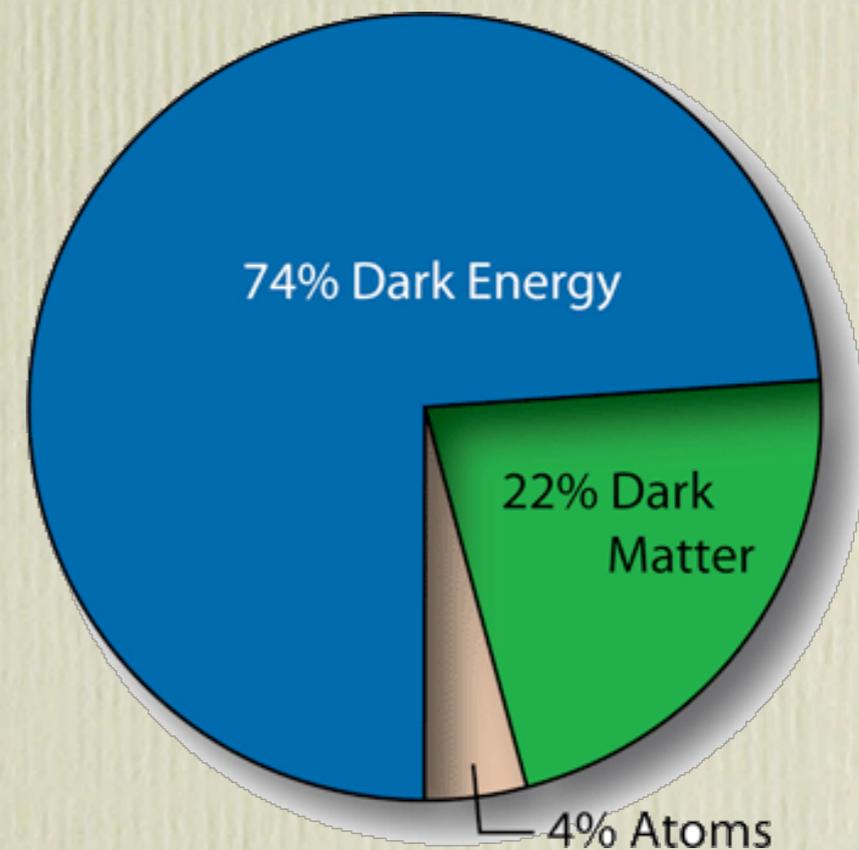
Photo: Homewood Photography

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"*.

L'énergie noire (ou Λ)

- Les observations récentes sont compatibles avec un univers plat
- La densité d'énergie dans l'univers semble être dominée aujourd'hui par une composante qui se comporte comme la constante cosmologique.
- Λ : Gravité répulsive !
- Énergie du vide (fluctuations quantiques) \implies l'énergie noire ?
- Détermination de l'équation d'état: $p = w(z) \rho$
- $w(z) = -1$ pour la constante cosmologique (Λ)



The End

The End

COSMOLOGY MARCHES ON



La cosmologie vue par S. Harris

Cosmologie FRW

Métrie FRW (Friedman-Robertson-Walker)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi) \right]$$

Facteur d'échelle $a(t)$ - sans dimension $a(t) = R(t)/R(0)$

Taux d'expansion (paramètre de Hubble $H(t)$) $H(t) = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{da/dt}{a}$

Variation du taux d'expansion (accélération)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

Densité critique $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$ $\Omega_x = \frac{\rho_c}{\rho_c}$

$$\rho_c(t = 0) = 1.88 \times 10^{-26} h_0^2 \text{ kg/m}^3 = 1.05 \times 10^{-5} h_0^2 \text{ GeV/cm}^3$$

Cosmologie et distances

Distance de diamètre angulaire $d_A(z)$

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 E(z) = H_0 \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_r (1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right]^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \Omega_{tot} = 1 & : d_A = L_H \times \frac{1}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} \\ \Omega_{tot} < 1 & : d_A = L_H \times \frac{1}{(1+z)} \frac{1}{\sqrt{1-\Omega_{tot}}} \sinh \left(\sqrt{(1-\Omega_{tot})} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} \right) \\ \Omega_{tot} > 1 & : d_A = L_H \times \frac{1}{(1+z)} \frac{1}{\sqrt{\Omega_{tot}-1}} \sin \left(\sqrt{(\Omega_{tot}-1)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} \right) \end{aligned}$$

Distance de luminosité $d_L(z)$ $d_L = d_A \times (1+z)^2$

$$\text{temps} = t_H \times \int_0^z \frac{dz}{(1+z)E(z)}$$