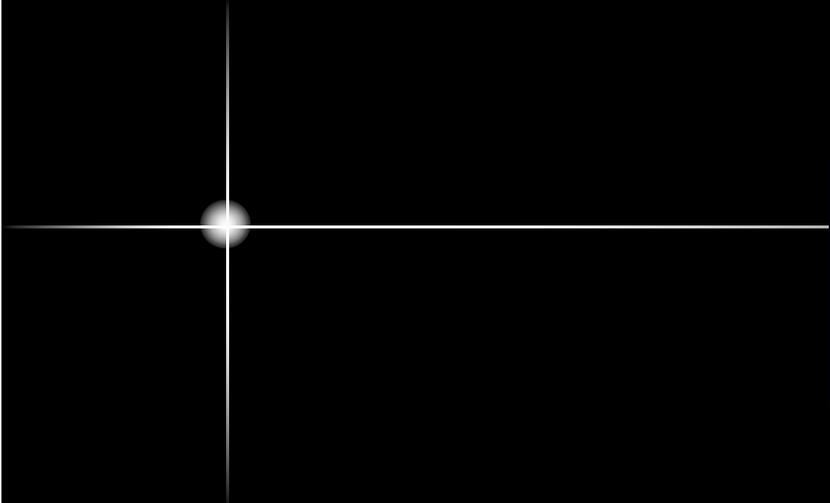


ULB



Gravitation et matière sombre

B. Famaey

Institut d'Astronomie et d'Astrophysique

U.L.B.

Gravitation

- Principe d'inertie (Galilée-Newton): un corps sur lequel n'agit aucune force se meut en ligne droite a vitesse constante (observateur inertiel)
- Deuxième loi de Newton: $a = F/m$
- Loi de la gravitation: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
- La plus faible de forces de la nature, mais aussi la seule qui agit à longue distance
 - => La force qui gouverne la dynamique de l'Univers à grande échelle

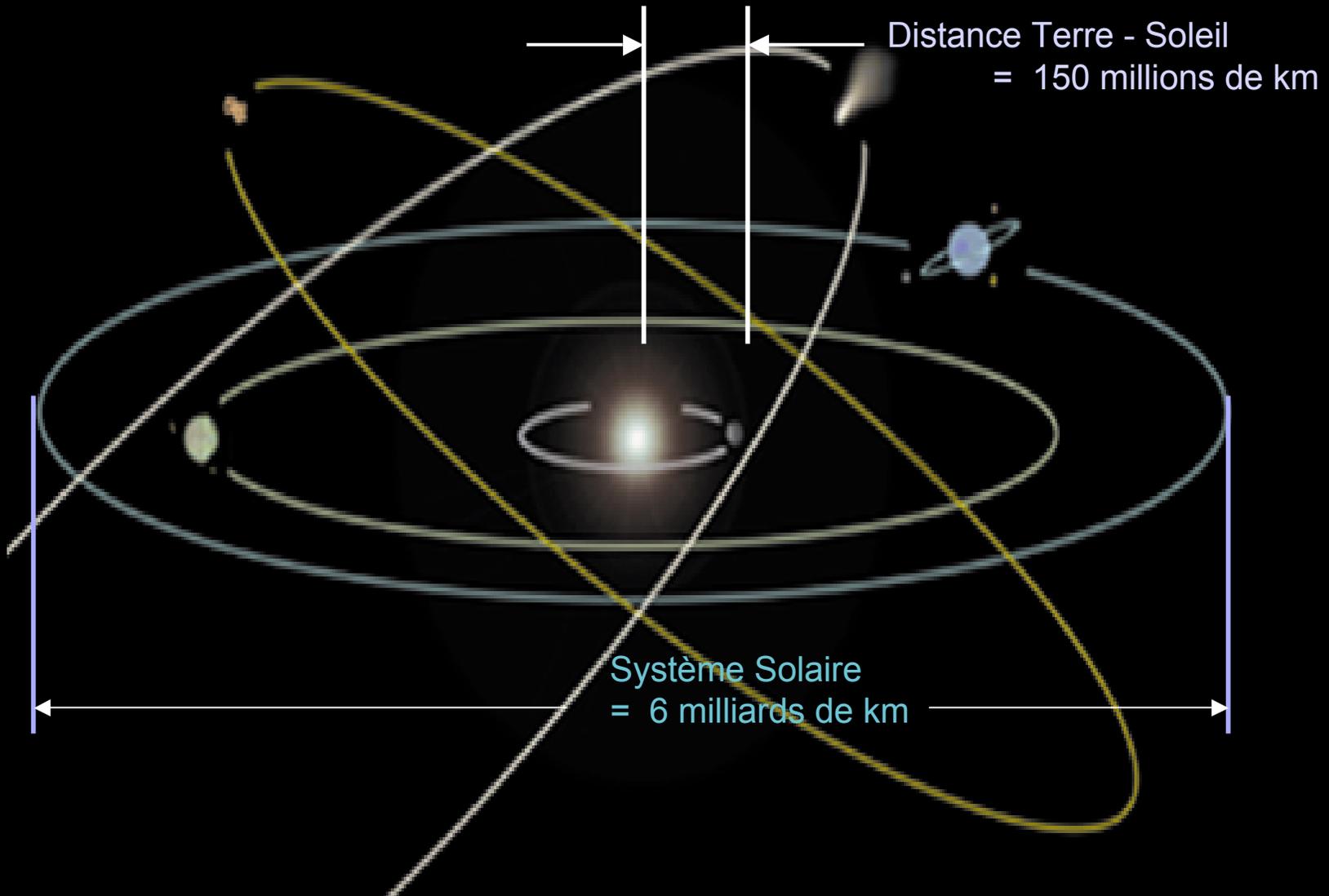
Pesanteur

- Sur terre: poids d'une personne de masse m
 $= (G M_{\text{terre}} m)/r_{\text{terre}}^2$
- $r_{\text{terre}} = 6500 \text{ km}$
- $M_{\text{terre}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$

- Accélération de $\sim 10 \text{ m/s}^2$ pour tous les objets en chute libre mais légèrement moindre à l'équateur car « rayon » plus grand



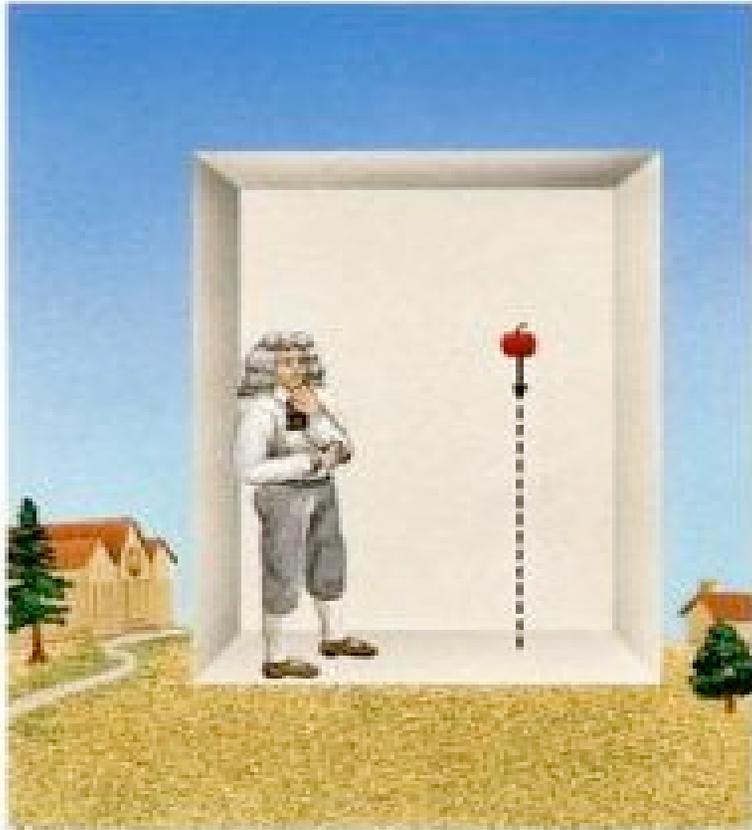
Unification des phénomènes terrestres et célestes



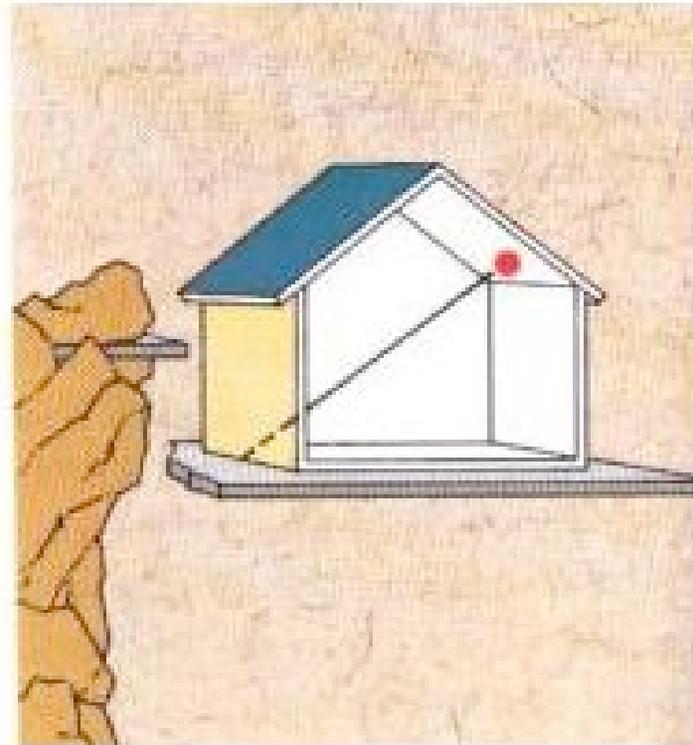
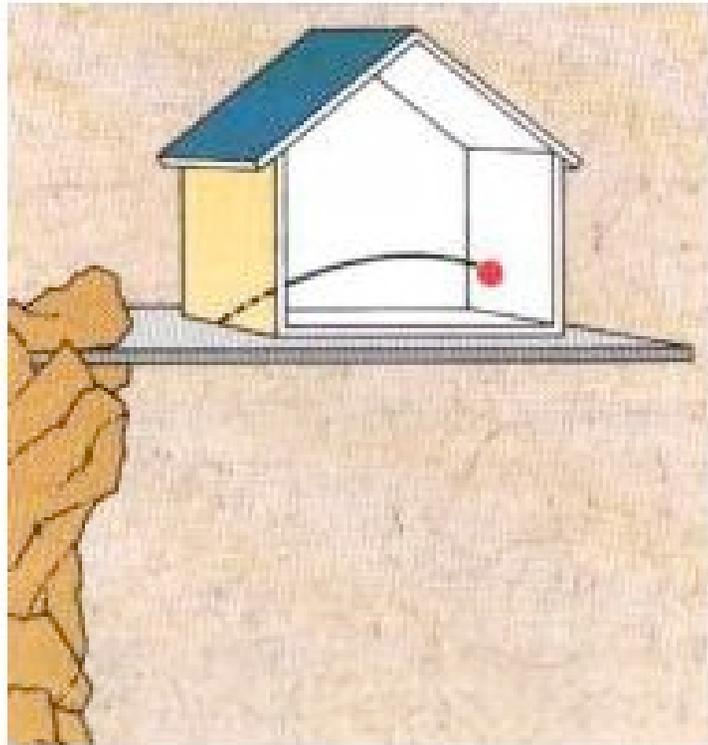
Principe d'équivalence

- Equivalence entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle: pourquoi?
- Einstein répond « parce que l'accélération et la gravitation ne peuvent être distinguées »
- Remarque: quand un astronaute flotte dans sa navette spatiale en orbite, il ne flotte pas parce qu'il échappe à la gravitation de la terre !!

Principe d'équivalence



Principe d'équivalence

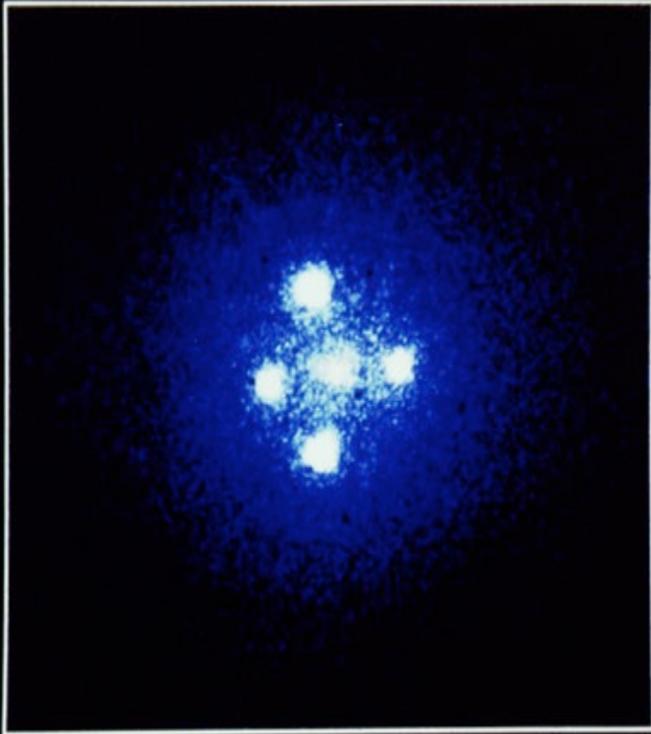


Relativité Générale

- Toutes les lois physiques sont les mêmes pour les observateurs en chute libre (nouveaux observateurs inertiels)
- La gravitation N'EST PAS une force, la masse courbe l'espace-temps et les objets s'y déplacent en ligne « droite » (géodésique) en l'absence d'autres forces
- Les seules vraies accélérations $a = F/m$ sont dues aux trois autres forces: au repos nous sommes des observateurs non-inertiels

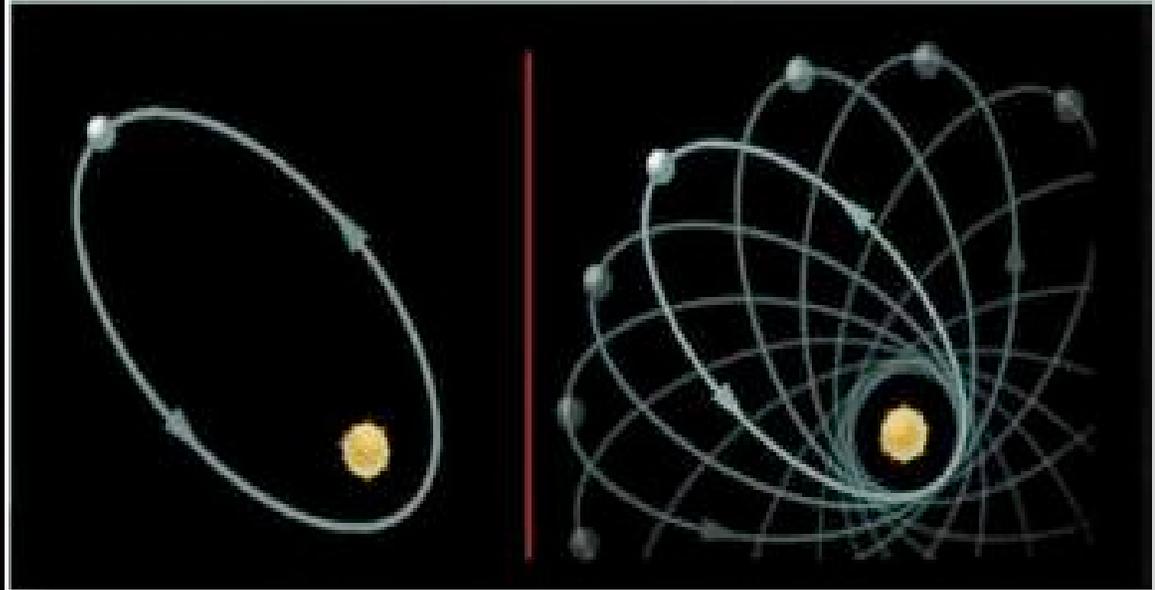
Einstein surpasse Newton

- Rayons lumineux sont eux aussi influencés par la gravitation
- Avance du périhélie de Mercure (Leverrier XIX^{ème} s.) pas due à la présence de la planète Vulcain
- Pour les faibles forces gravitationnelles, Newton reste valable excepté pour les rayons lumineux
- Mais... unification?
- Contradictions avec mécanique quantique
- + testé uniquement à l'échelle du système solaire!



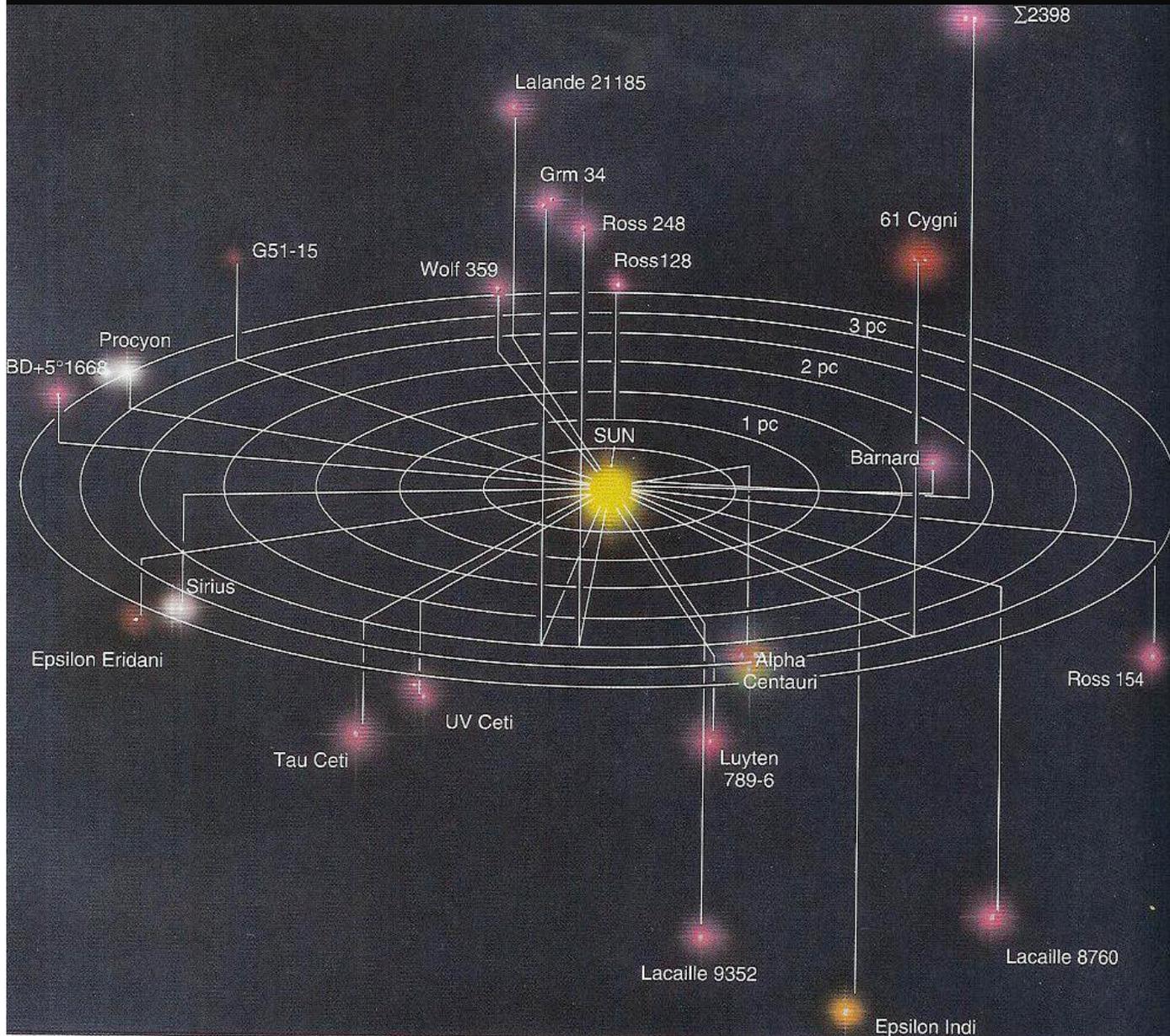
Gravitational Lens G2237+0305

MERCURY'S ORBIT



- Mais... unification?
- Contradictions avec mécanique quantique
- + testé uniquement à l'échelle du système solaire!

Eloignons nous un peu... Le voisinage solaire

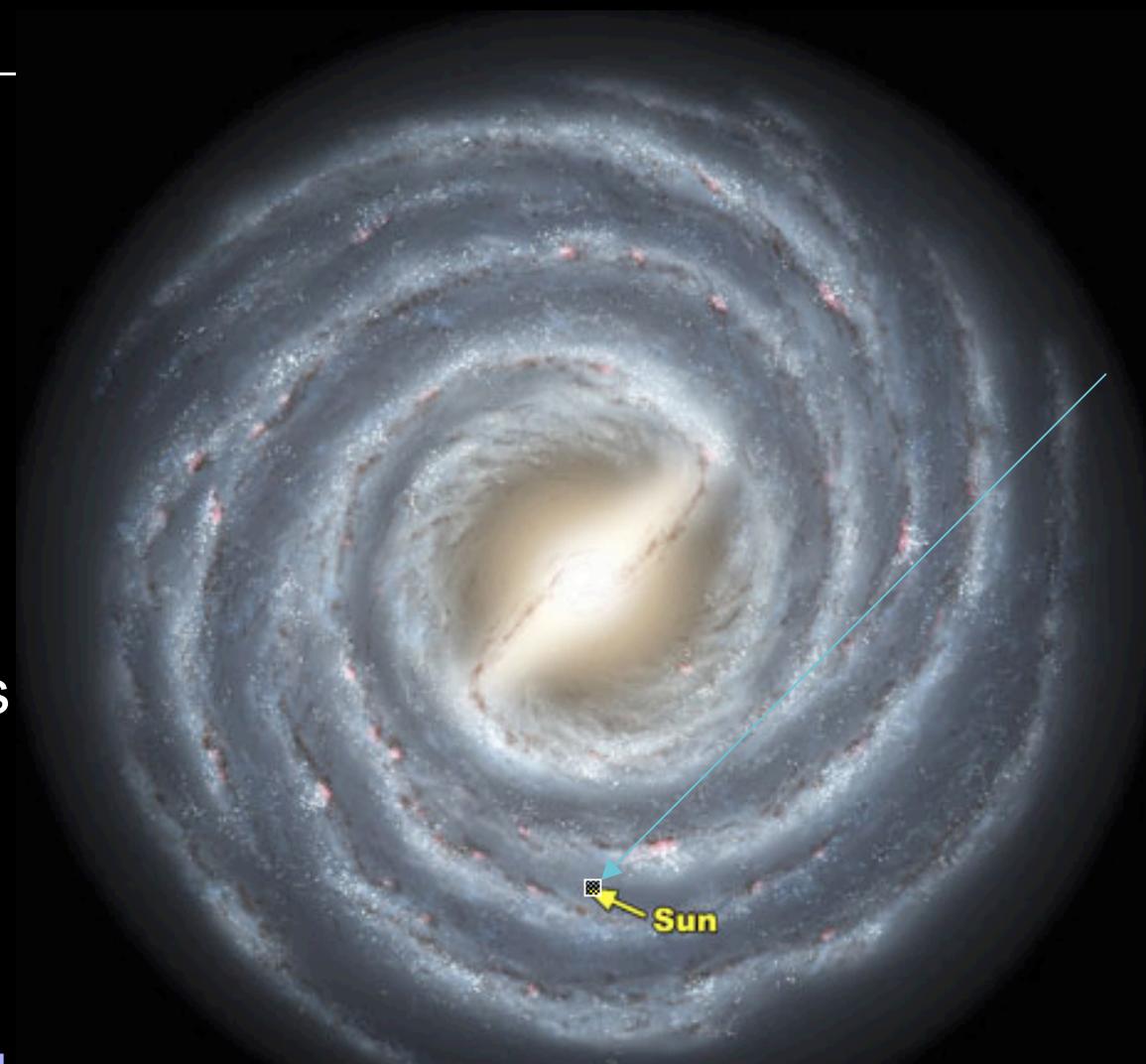


20 années-lumière

La Voie Lactée: une galaxie parmi d'autres

Notre
Galaxie
(vue d'artiste
réaliste)

100 milliards
d'étoiles



Voisinage
du Soleil

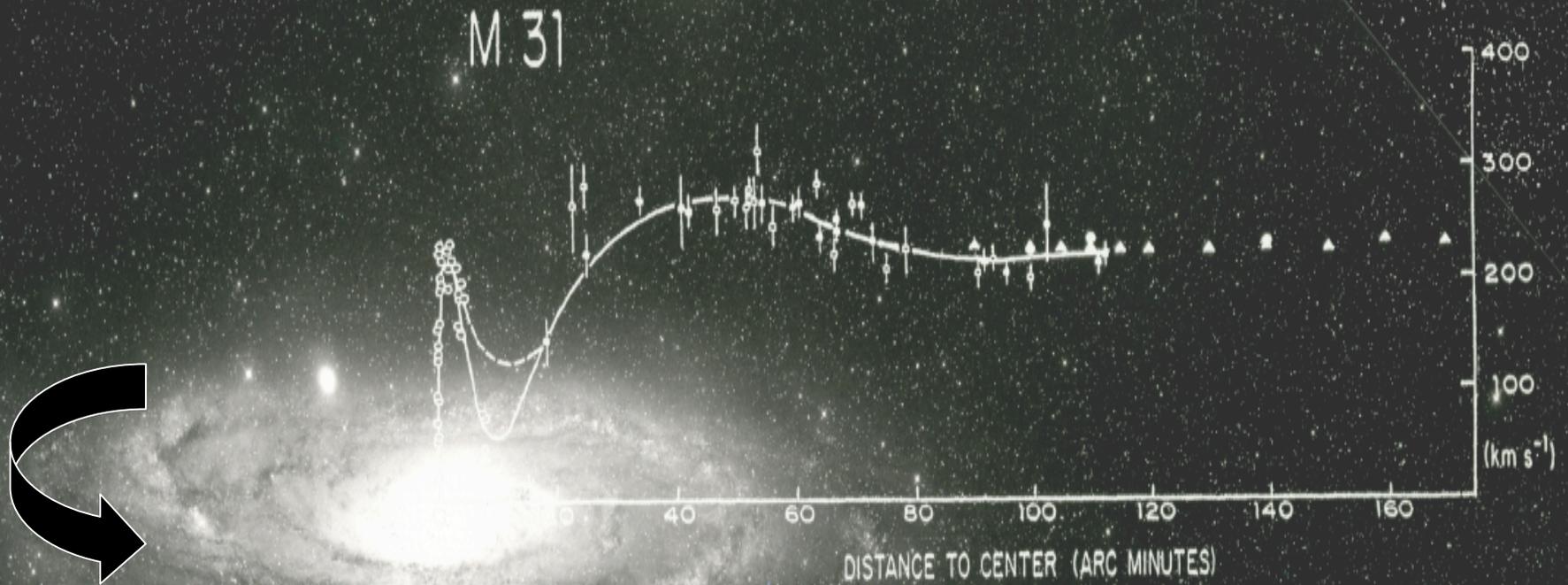
Sun

100.000 années-lumière

Petit résumé des mouvements célestes:

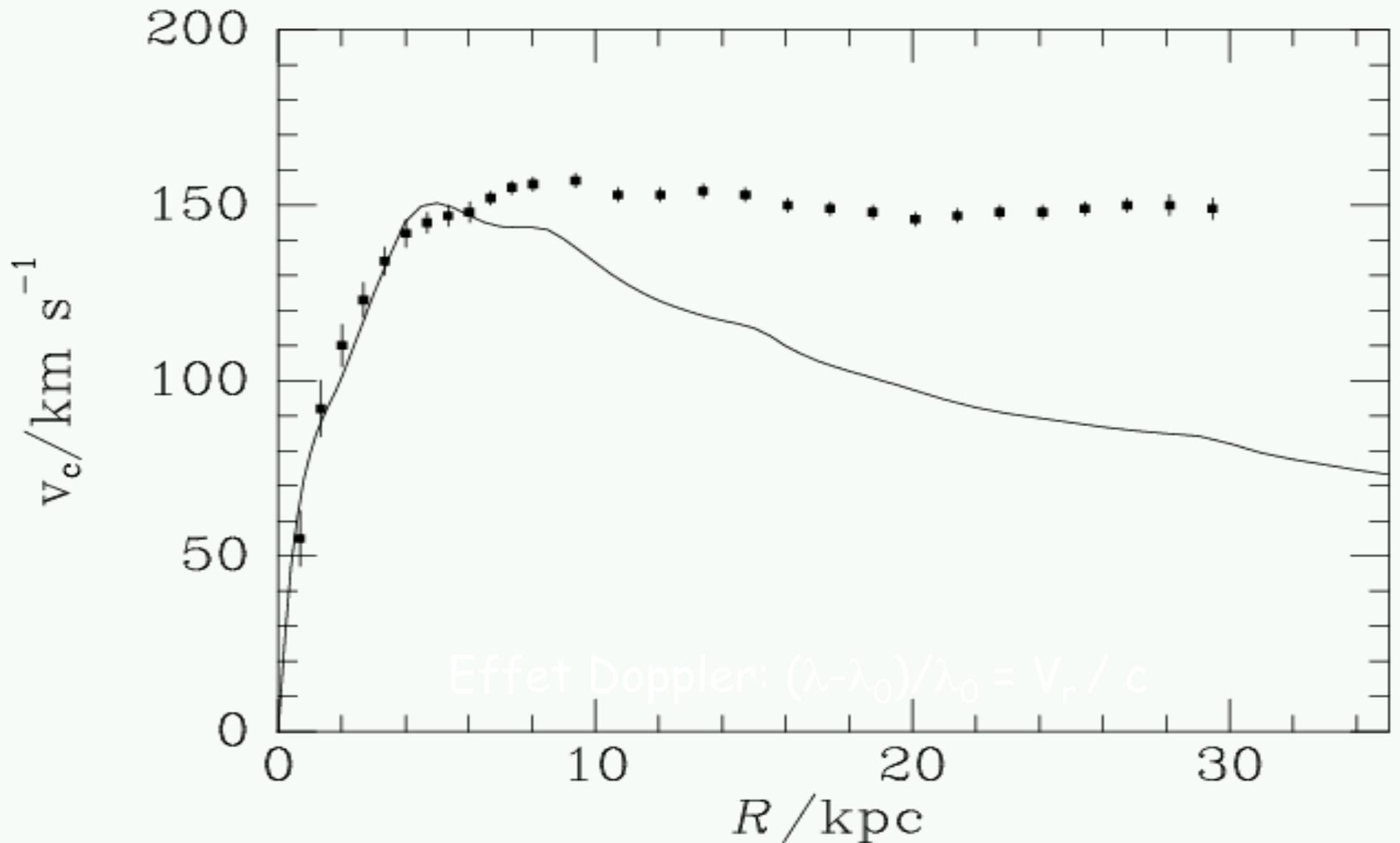
- La terre tourne autour du soleil en 365 jours
(30 km/s)
- Le soleil tourne à 220 km/s par rapport au
centre de la Voie Lactée
- Il fait un tour en 200 millions d'années
(Le soleil est donc âgé de 5 milliards d'années
terrestres mais de seulement 25 années galactiques)

Rotation trop rapide



Effet Doppler: $(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = V_r / c$

Rotation trop rapide



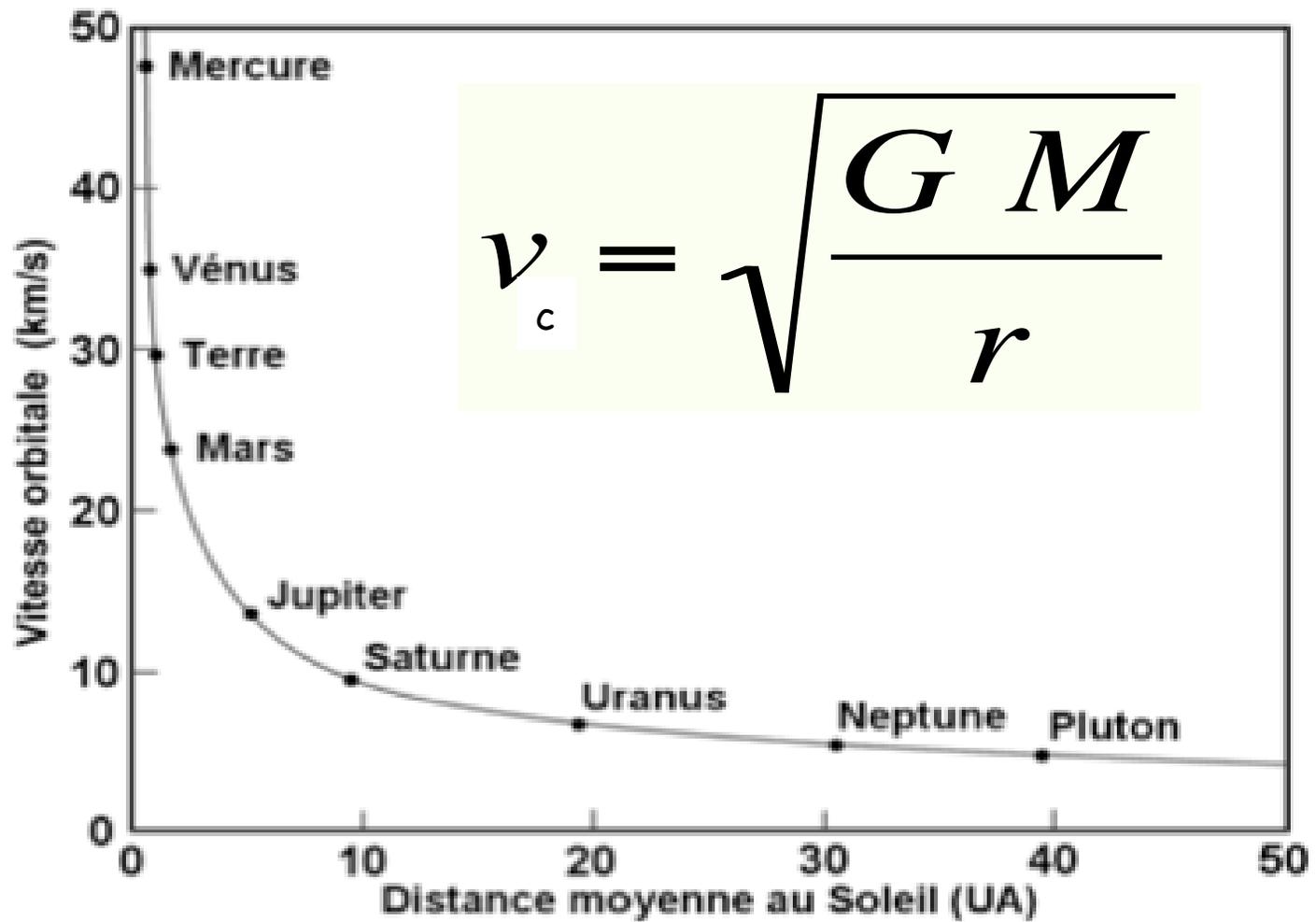
- En symétrie sphérique, théorème de Gauss:

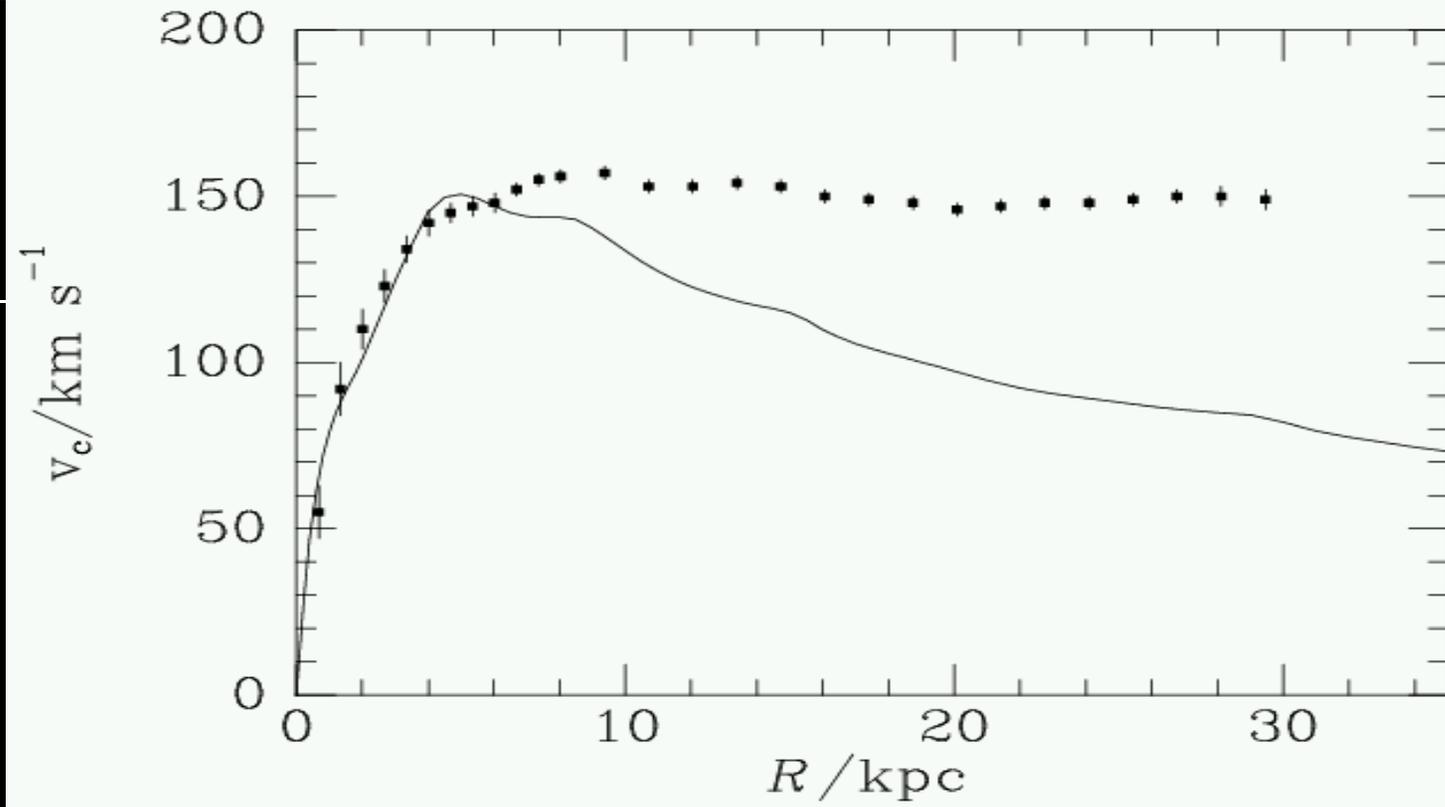
$$\mathbf{F} / m = G M(r) / r^2$$

- A l'équilibre:

$$V_c^2 / r = G M(r) / r^2$$

- Or majorité de la masse visible dans le bulbe central (cf système solaire)





- Ce n'est pas que l'amplitude mais aussi la forme de la courbe de rotation qui est anormale:

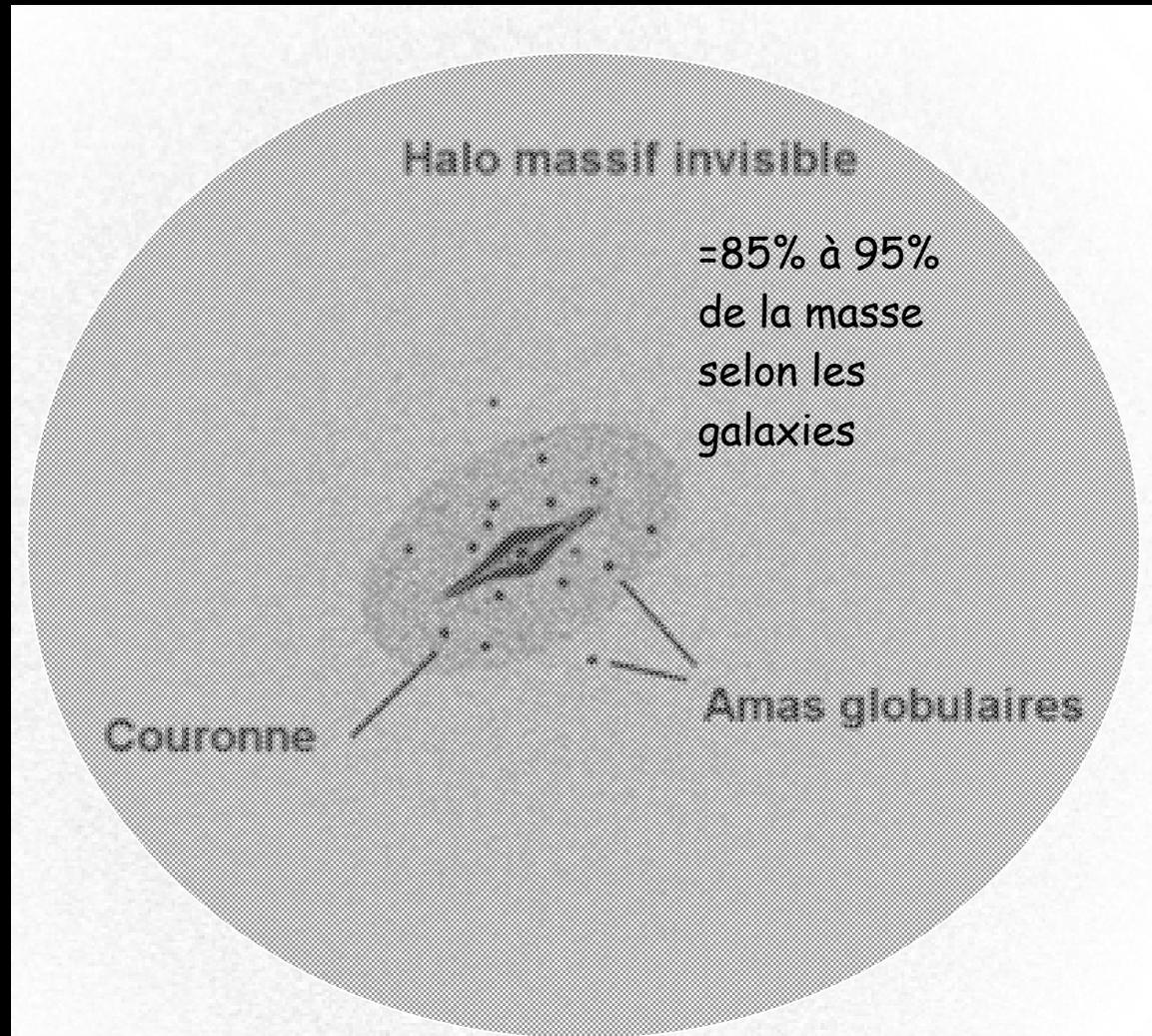
$$V_c = \text{cste} \Rightarrow M(r) \propto r$$

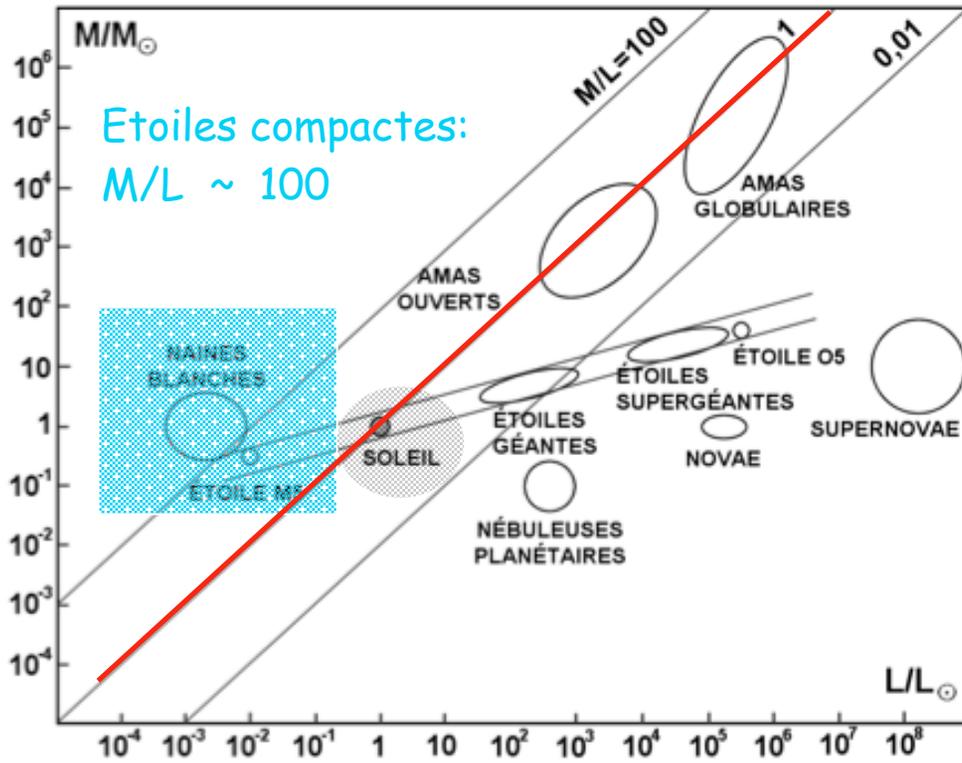
- Or $M(r) = \int 4 \pi r^2 \rho(r) dr$

$$\Rightarrow \rho(r) \propto r^{-2}$$

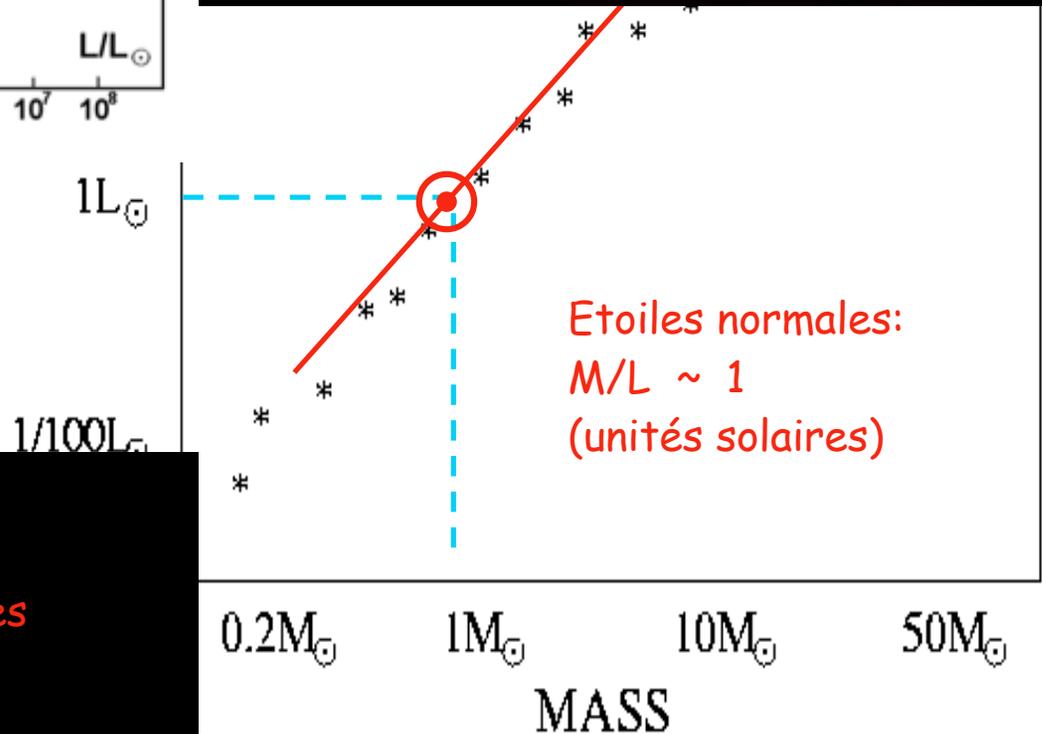
- Or $\rho_{\text{vis}}(r) \propto e^{-r/r_0}$

Halo de matière sombre





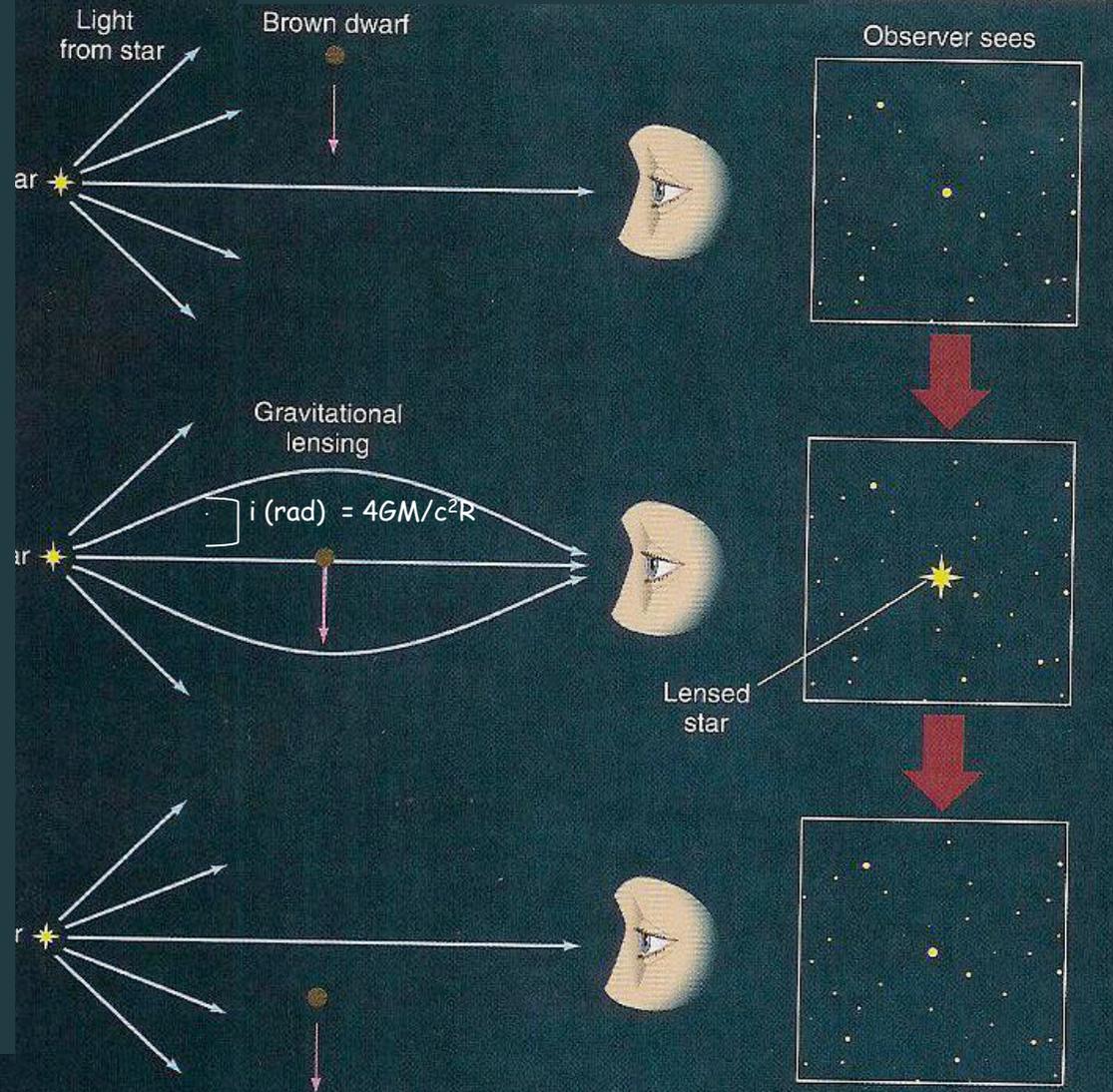
Les étoiles compactes, caractérisées par un rapport masse / luminosité $M/L \sim 100$, sont-elles à l'origine de ce halo de matière sombre?



Pour le savoir, utilisons la technique des lentilles gravitationnelles

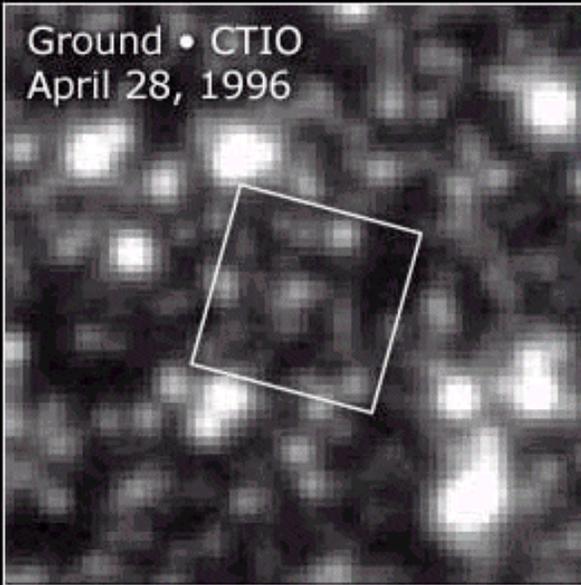
Micro-lentille gravitationnelle

Etoile (invisible: $M/L \gg 1$)

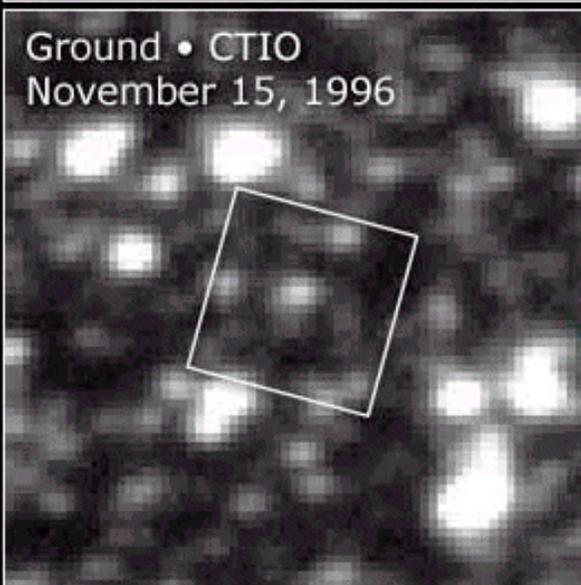


Le nombre d'événements observés est **insuffisant** pour rendre compte du halo de matière sombre

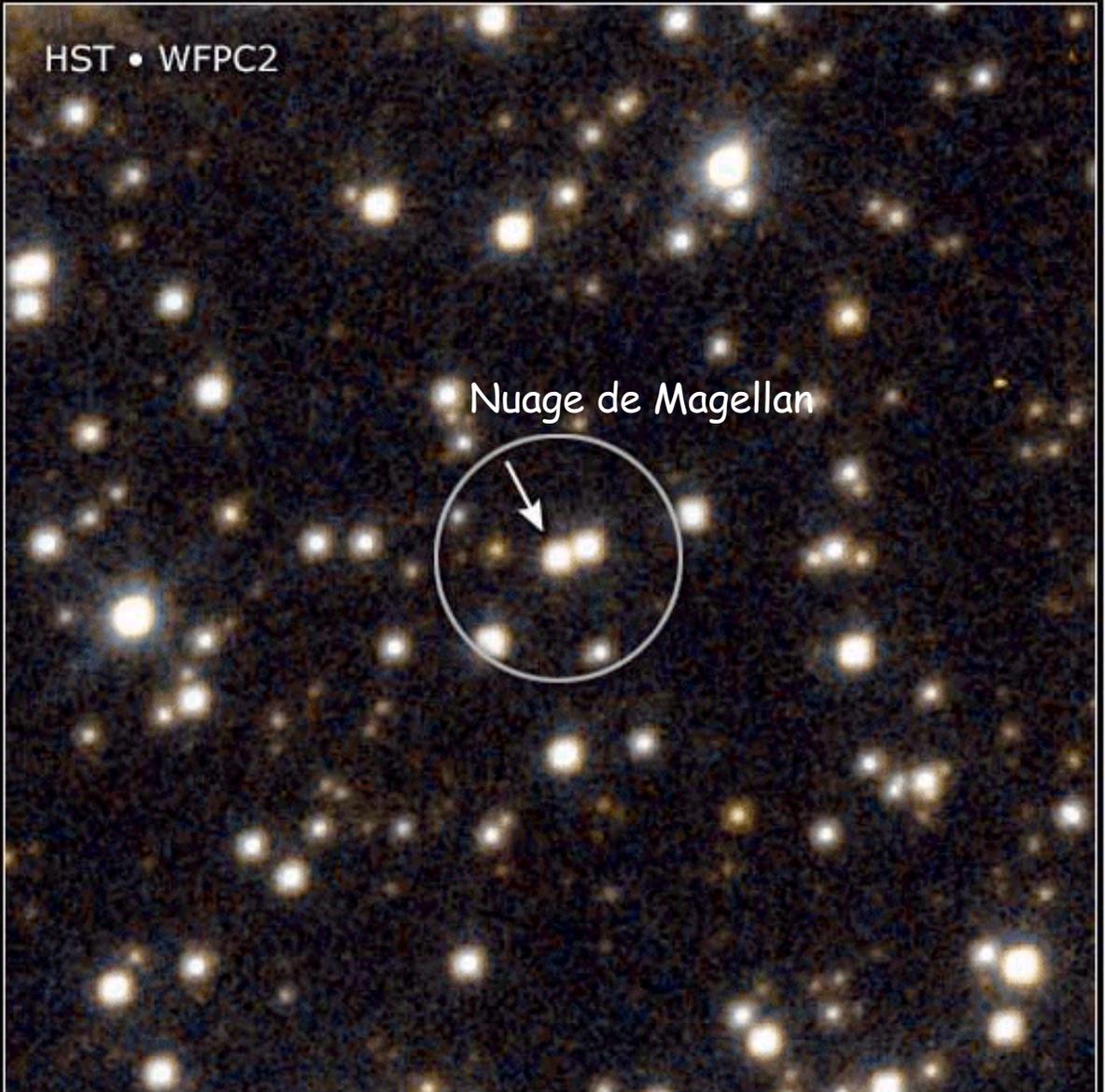
Ground • CTIO
April 28, 1996



Ground • CTIO
November 15, 1996



HST • WFPC2

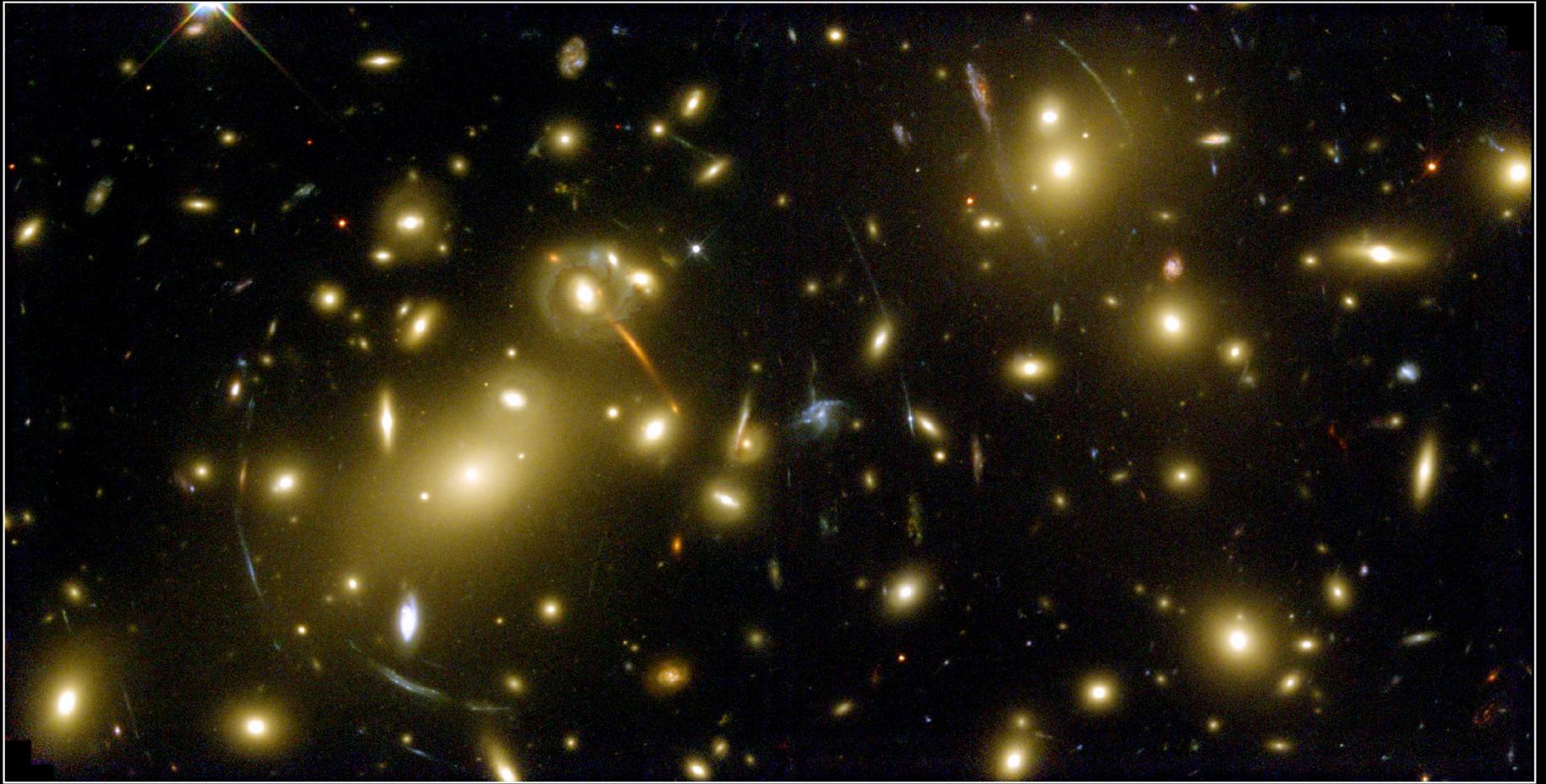


Microlens Event MACHO-96-BLG-5

HST • WFPC2

NASA and D. Bennett (Notre Dame University) • STScI-PRC00-03

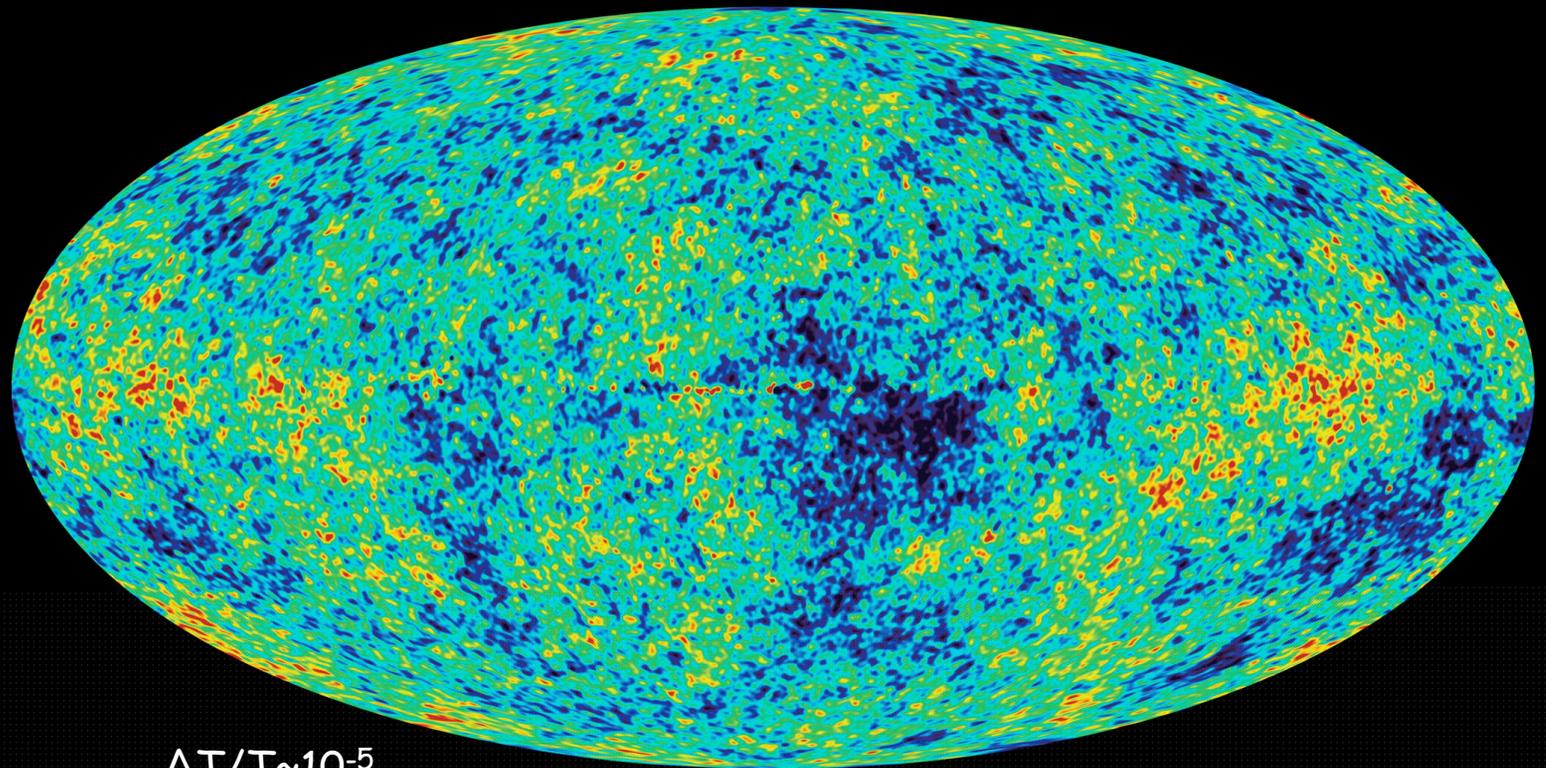
La présence de matière sombre est confirmée également
aux très grandes échelles des amas de galaxies...



Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

Anisotropies du rayonnement fossile du Big Bang



Matière non-ordinaire?

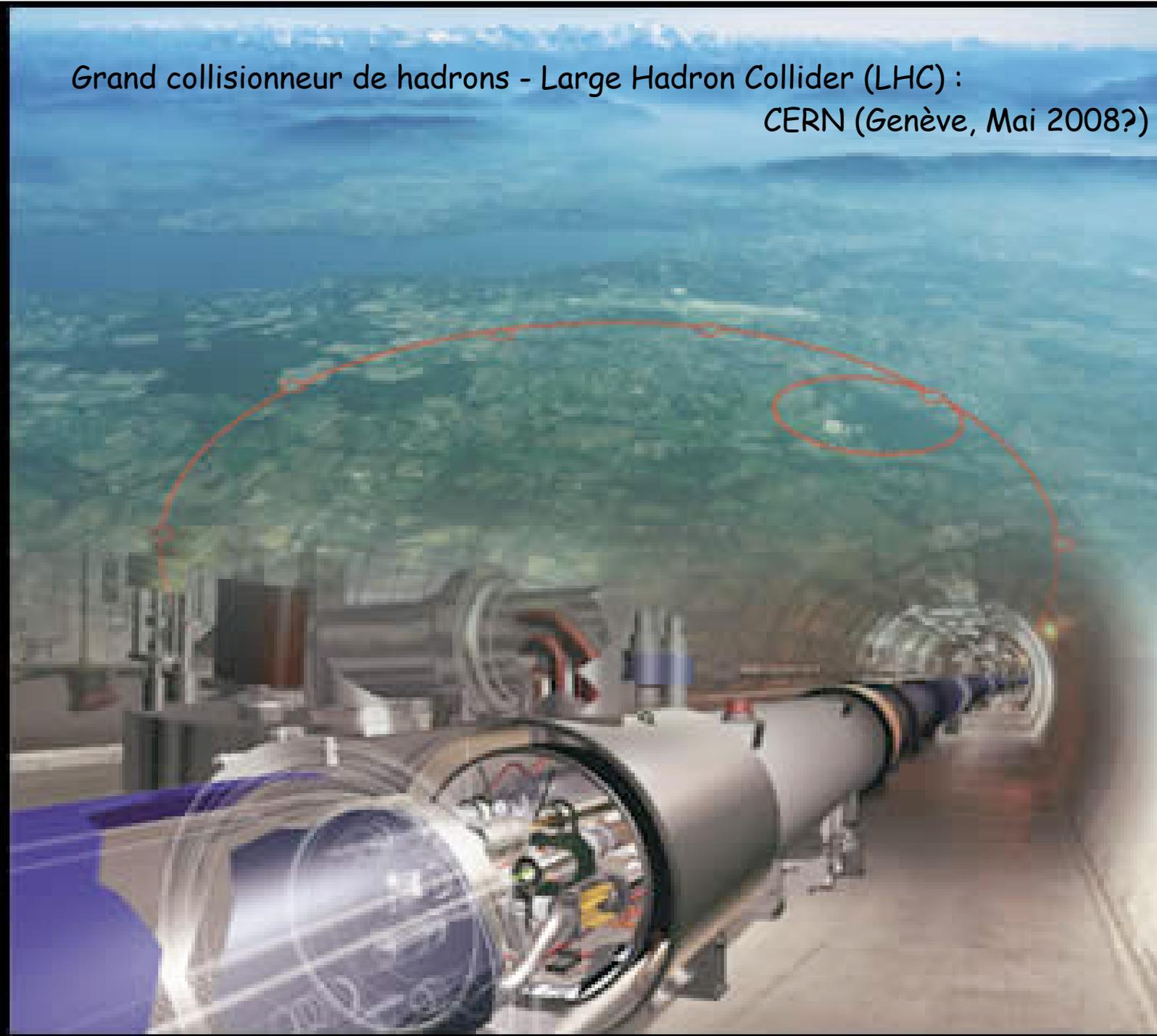
- Modèle standard: matière composée de leptons (par exemple les électrons et positrons) et de quarks
- Hadrons = particules composées de quarks
- Baryons = particules composées de trois quarks (par exemple les protons et neutrons)

- GUT (Grand Unified Theory) => leptons et quarks équivalents à une température $T > 10^{28}$ K
- GUT => proton doit se désintégrer en une paire de quarks et un positron (pas observé!)

Les WIMP

- Pour diminuer la probabilité de désintégration du proton, on a introduit la **SUPERSYMETRIE** (fermions et bosons équivalents à 10^{32} K, nouveau zoo de particules créées lorsque la température de l'univers est passé sous cette température)
=> **Weakly Interactive Massive Particles (WIMP)**
- Pas détectées directement (collisions) ou indirectement (rayons gamma ou neutrinos). Pourront peut-être être créées dans le LHC. Mais modèles de formation hiérarchique des structure
=> particules très massives (10^{12} eV/c²)

Grand collisionneur de hadrons - Large Hadron Collider (LHC) :
CERN (Genève, Mai 2008?)



Les WIMP expliquent-elles tout?

Simulations de la formation de halos :

=> concentration de matière sombre beaucoup trop élevée au centre (« cusp ») + comparaison aux microlentilles vers le centre galactique

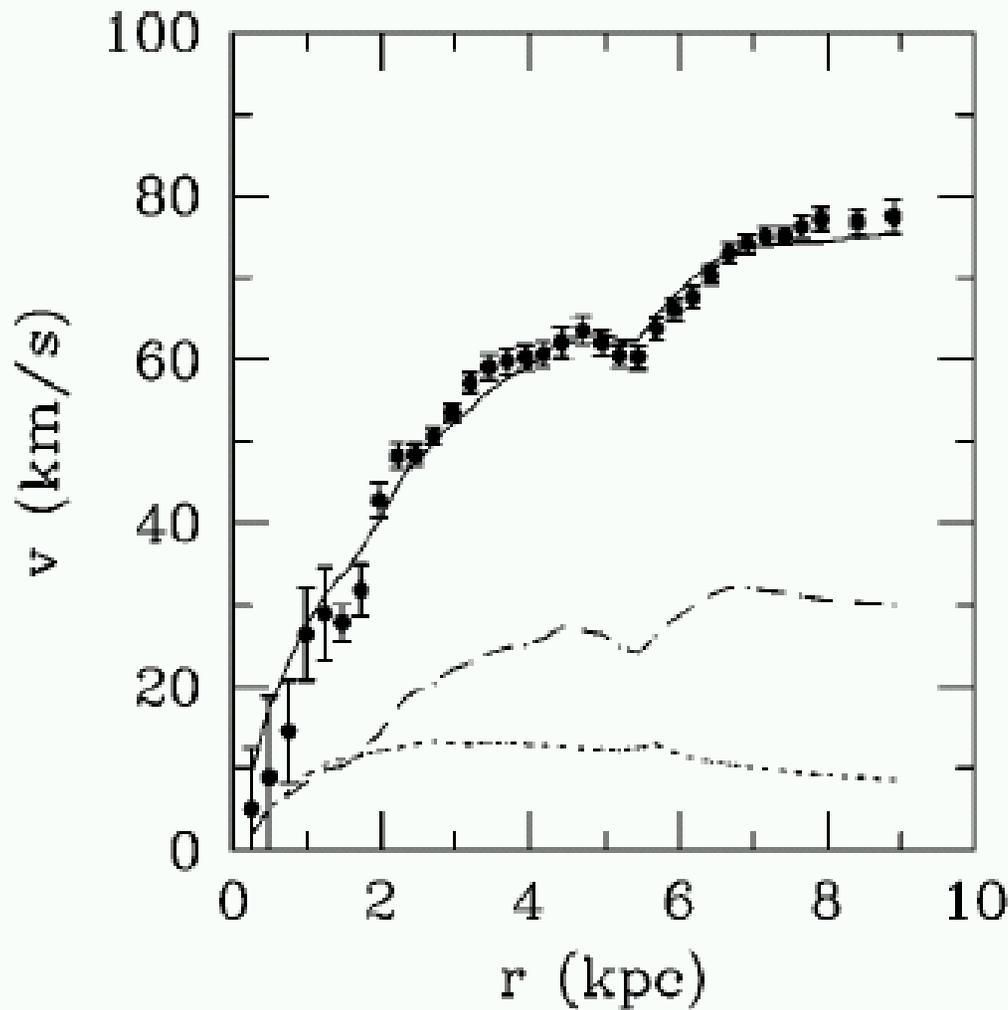
=> trop de galaxies satellites

=> quid de la variation de la vitesse de rotation dans les galaxies suivant les variations de lumière

=> quid de la relation de Tully-Fisher?

$$V_c^4 \propto M_{\text{vis}}$$

Les WIMP expliquent-elles tout?



NGC 1560

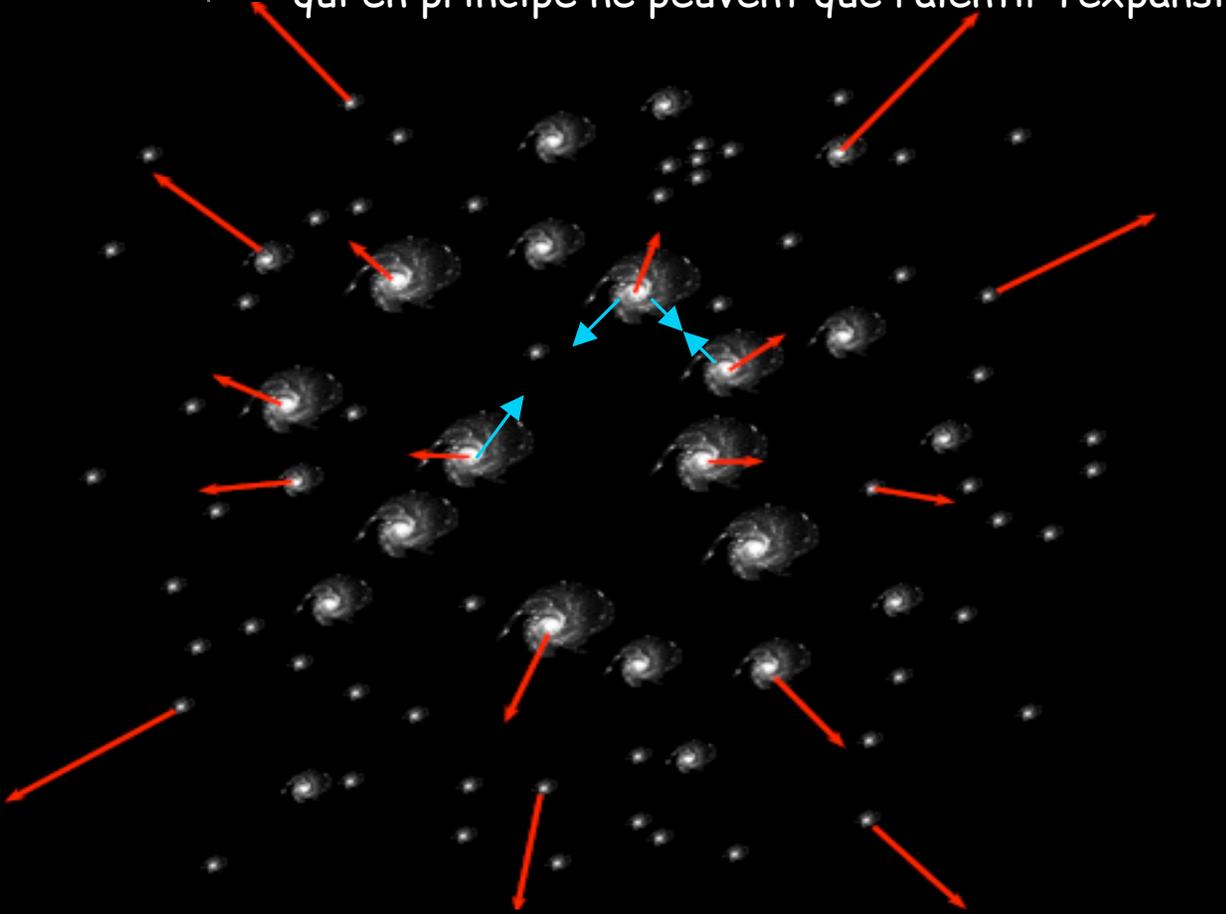
$$\langle \mu_B \rangle = 23.2 \text{ mag/a}$$

$$(M/L_B)_{\text{disk}} = 0.4$$

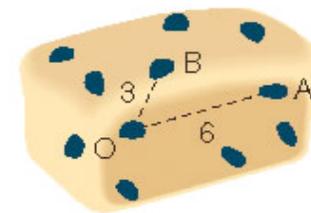
Interaction de la matière
sombre avec la matière
ordinaire ou modification
de la gravitation?

L'univers est en expansion... (loi de Hubble)

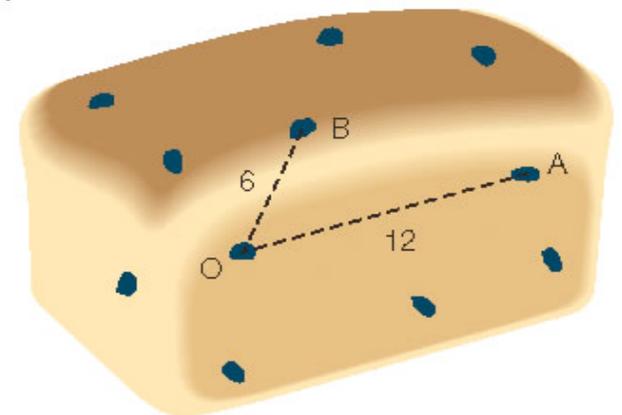
... mais cette expansion (de la trame d'espace-temps) est contrecarrée par les forces d'attraction gravitationnelles entre galaxies qui en principe ne peuvent que ralentir l'expansion.



a)

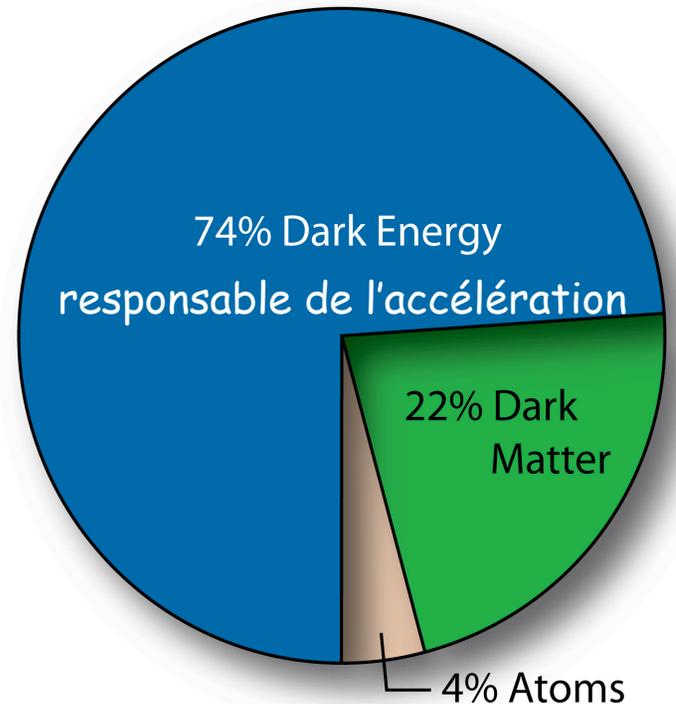
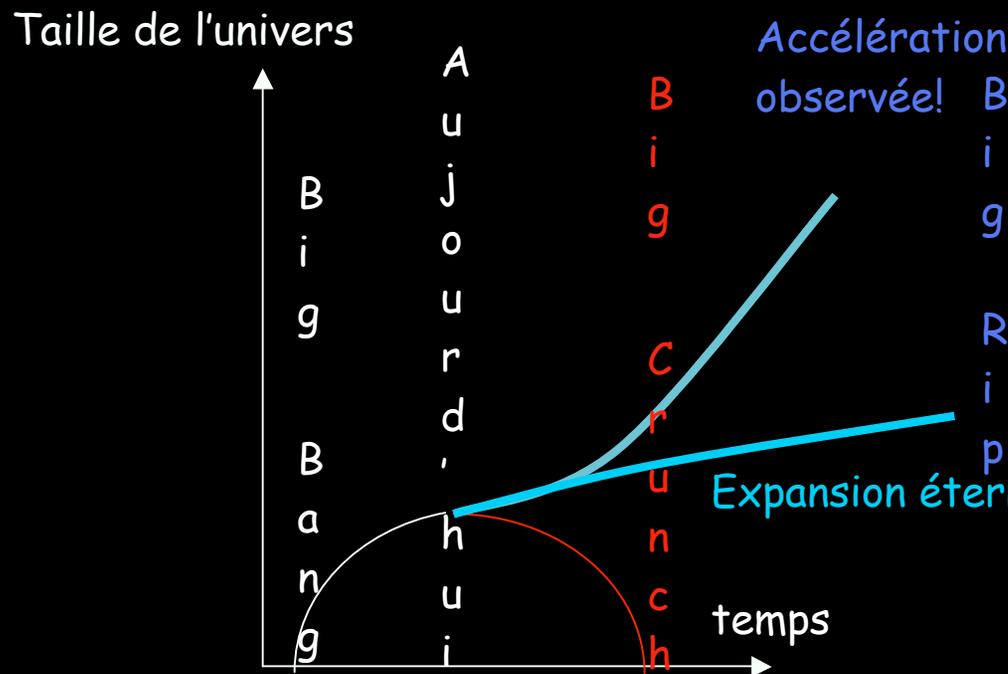


b)



L'univers est en expansion... (loi de Hubble)

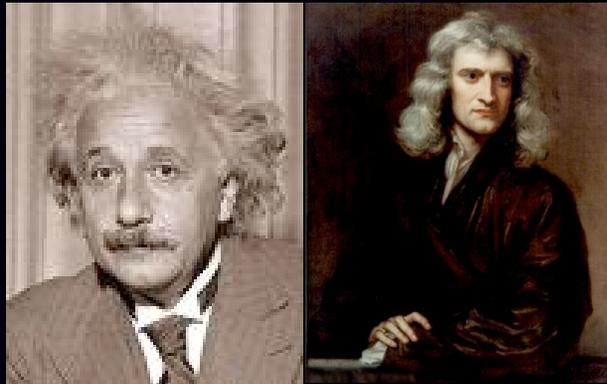
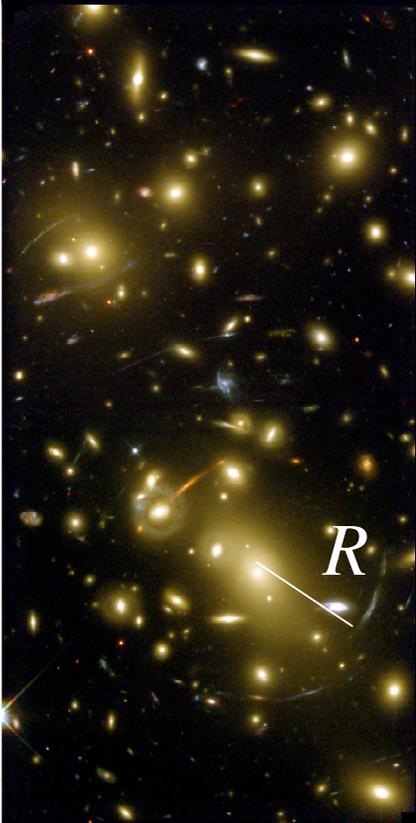
... mais cette expansion (de la trame d'espace-temps) est contrecarrée par les forces d'attraction gravitationnelles entre galaxies qui en principe ne peuvent que ralentir l'expansion. Mais Observation de **supernovae lointaines** en fonction de leur vitesse d'éloignement **moins brillantes que prévu !**
=> plus éloignées => **l'expansion de l'Univers accélère !**



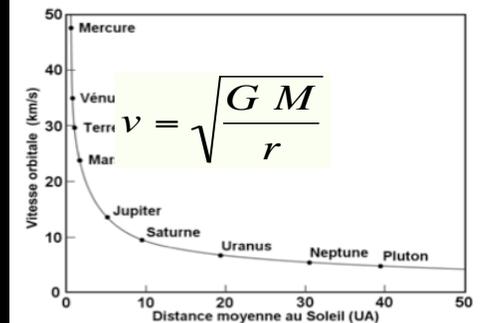
Energie sombre

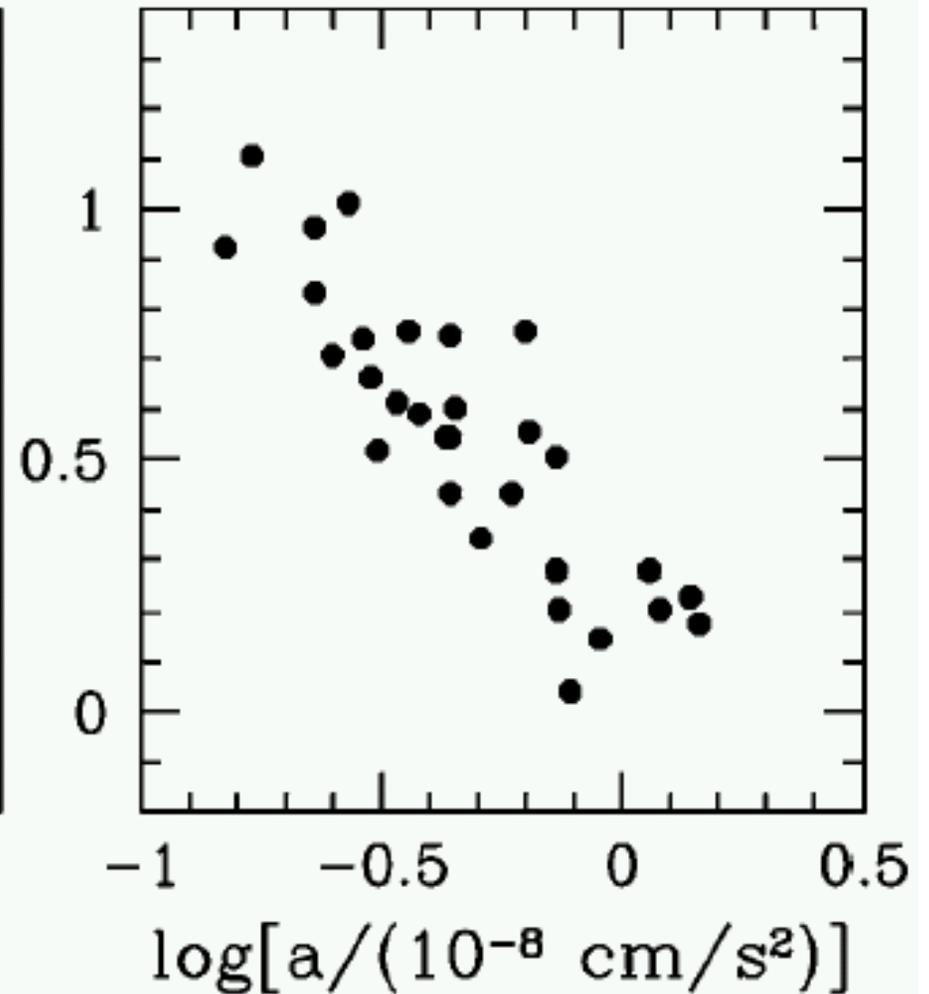
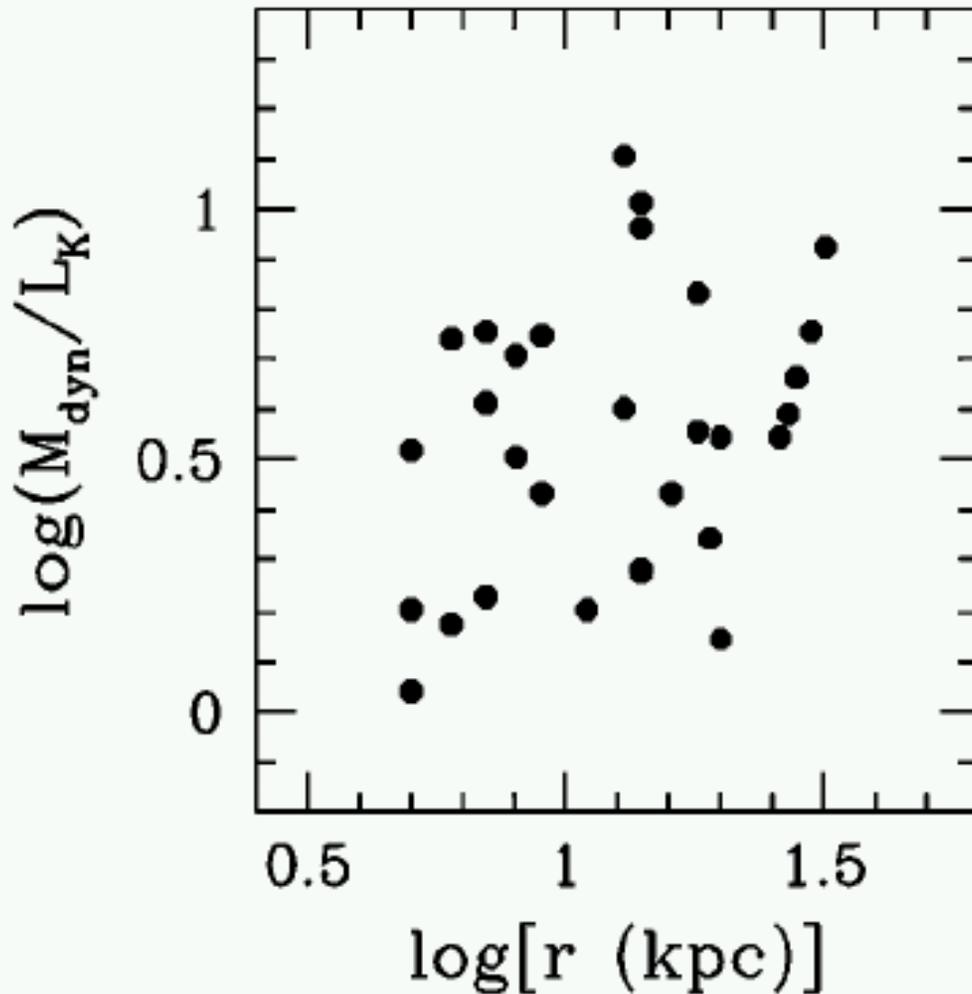
- Elle a une action répulsive, ne se dilue pas dans l'expansion... peut-être l'énergie du vide... mais trop petite... Mystère!
- Coïncidence de la proportion actuelle de cette énergie
- Les deux composantes invisibles du modèle de concordance ne se manifestent que par leurs effets gravitationnels... la gravitation pourrait-elle être en cause?

Et si les lois de la gravitation énoncées par Einstein & Newton n'étaient pas correctes?



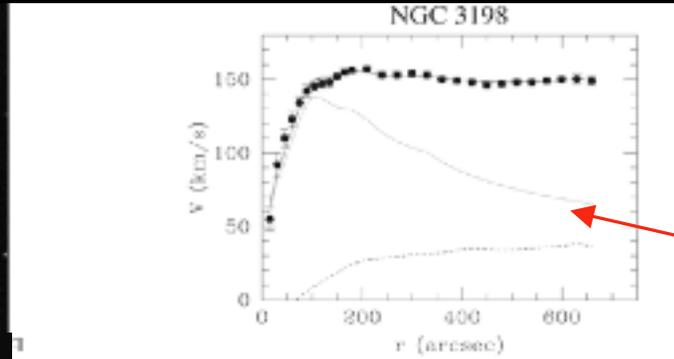
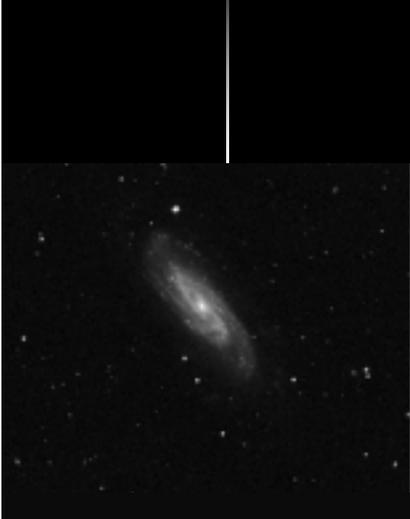
$$i \text{ (rad)} = 4GM/c^2R$$





Au plus la gravité est faible à la périphérie du système au plus la quantité de « matière sombre » est importante...

Une alternative à la matière sombre: Modified Newtonian Dynamics (MOND)



Si la masse de la galaxie est concentrée dans son bulbe, la gravitation newtonienne prévoit:

$$v = \sqrt{\frac{G M}{r}}$$

$$\frac{v^2}{r} = g_N = \frac{G M}{r^2}$$

Or la courbe de rotation est « plate » (ne dépend pas de r , la distance au bulbe).

Comment modifier l'expression de la gravité (g) pour que v ne dépende pas de r ?

Une solution possible: Modifier g de sorte qu'elle varie comme $1/r$ plutôt que $1/r^2$

$$\frac{v^2}{r} = g_M = \sqrt{\frac{G M}{r^2}} \sqrt{a_0} = \frac{\sqrt{G M a_0}}{r}$$

$$v^2 = \sqrt{G M a_0} \Rightarrow \text{Tully-Fisher}$$

$$g_M = \sqrt{g_N a_0}$$

...aux faibles accélérations $g_M \ll a_0$

où $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

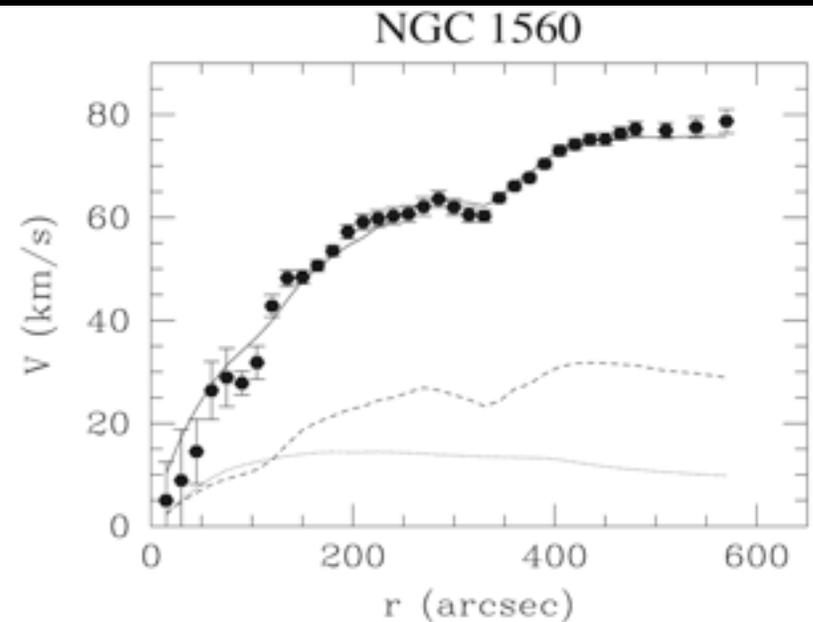
A titre de comparaison: $g_T = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

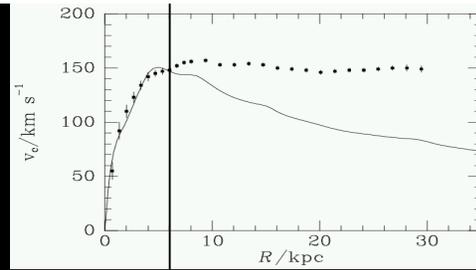
Y a-t-il d'autres justifications en faveur de MOND ?

Oui!

1. Forte corrélation entre « bosse » dans la courbe de rotation et dans la distribution de lumière :

- Difficile à expliquer par la matière sombre
- Explicable avec MOND





$$V^2/r = a_0$$

2. La «matière sombre» apparaît toujours lorsque la gravité tombe sous a_0
3. Galaxies naines de marée (NGC 5291: Gentile, Famaey, et al. 2007)

Analogie avec le champ électrique

$$GM / r^2 = \mu g$$

avec $\mu = 1$ pour $g \gg a_0$

$\mu = g/a_0$ pour $g \ll a_0$

par exemple $\mu = g/(a_0+g)$

⇒ analogie avec le champ électrique E dans un matériau diélectrique (=isolant) situé à une distance r d'une charge extérieure Q

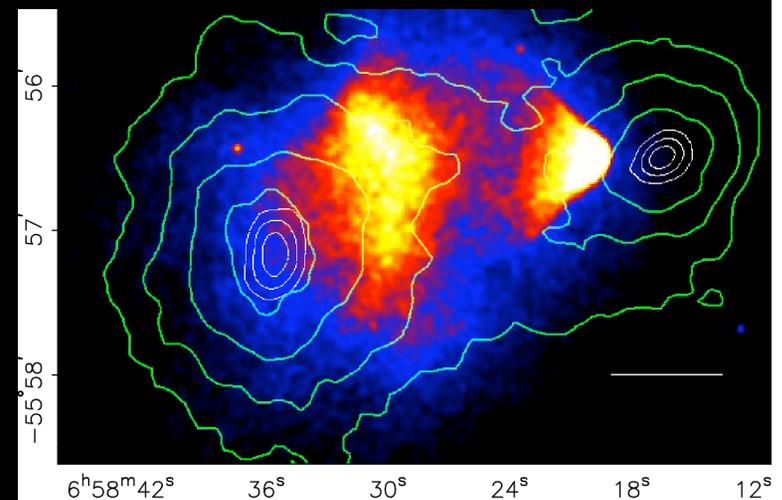
$$Q / (4 \pi r^2) = \mu E \quad \text{où } \mu \text{ est la permittivité}$$

Version relativiste de MOND

- Bekenstein (2004): modif. de la relativité générale qui redonne MOND, satisfaisant équivalence naturelle entre masse inertielle et gravitationnelle (ajout d'un champ de vecteurs)
- **Succès:** 1) Si on connaît la distribution des atomes dans une galaxie => cette théorie PREDIT la force gravitationnelle
 - 2) La formation des galaxies à partir des inhomogénéités primordiales EST possible
 - 3) Même l'énergie sombre pourrait disparaître (?)

- **Problèmes:** 1) Pas de principe de base comme le principe fort d'équivalence pour la relativité générale (principe de Mach? Version quantique?? Radiation de Unruh? Lien avec l'accélération de l'Univers?)
2) Principe d'équivalence fort brisé car accélération et gravitation peuvent être distinguées (effet de la gravitation extérieure dans un système de référence en chute libre)
3) On ne se débarasse pas de toute la matière sombre dans les amas (**solution** au problème des baryons manquants?)

Le « bullet » cluster: Angus, Shan, Zhao & Famaey (2007)

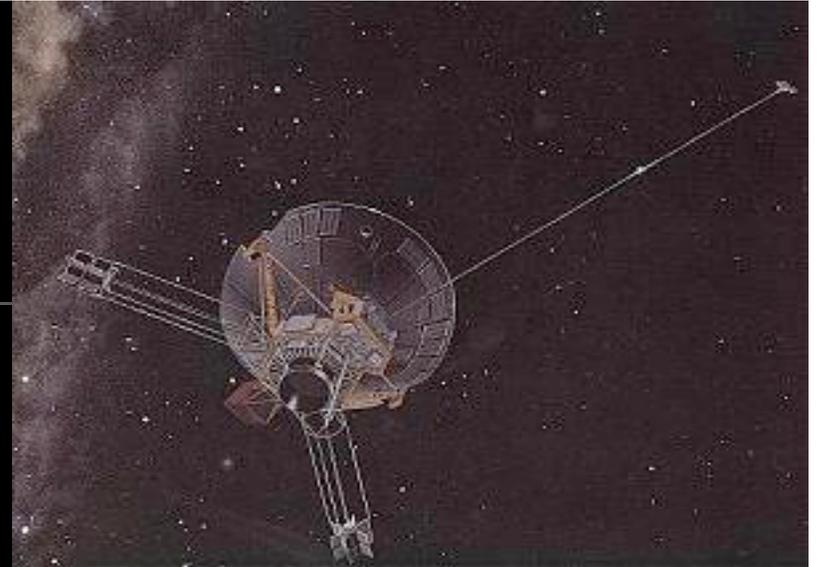


Anomalie Pioneer

- Plus près de nous, ce débat pourrait être tranché très bientôt !
- Mesure de la vitesse de la sonde Pioneer par effet Doppler... accélération anormale $a_p = 6 a_0$
- Si dirigée vers le soleil, cela pourrait être la première véritable preuve de la faillite de la RG (pas de matière sombre à si petite échelle)

L' anomalie Pioneer

Les sondes ralentissent pour une raison inexpliquée:
Pioneer 10 a accumulé 3 heures de retard en 30 ans!



Ulysses, Galileo : suspicion mais pas aussi nette car sondes pas aussi lointaines

Freinage anormal \sim un dix milliardième de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre

Comme si le Soleil était plus massif que prévu...

Retour à la question de la matière sombre...

Pas une prédiction de MOND non plus... orbite non-liée?

Conclusion (I)

- Soit la Relativité Générale reste valable à la périphérie des galaxies et en cosmologie:
 - pas d'anomalie Pioneer
 - La matière sombre existe bel et bien, de la même façon que l'existence de **Neptune** fut déduite des perturbations de l'orbite d'**Uranus**
 - Il faut comprendre pourquoi la relation empirique de MOND marche si bien dans les galaxies...
- Soit la Relativité Générale doit être modifiée:
 - La matière sombre n'existe pas dans les galaxies de la même façon que l'existence de **Vulcain** fut suspectée à partir des perturbations de l'orbite de **Mercur**e

Conclusion (II)

- Nous sommes de toute façon à l'aube d'une révolution (astro)physique quelle que soit la solution apportée aux problèmes de masse et d'énergie sombre
- Nous savons de toute façon que la gravitation DEVRA être modifiée pour s'accorder avec la physique de l'infiniment petit (« Grande Unification »)
- Ne pas transformer les modèles actuels en dogmes
(erreurs passées: géocentrisme, éther, Vulcain...)
sans pour autant les discréditer a priori
(Neptune)
- **Affaire à suivre...**