

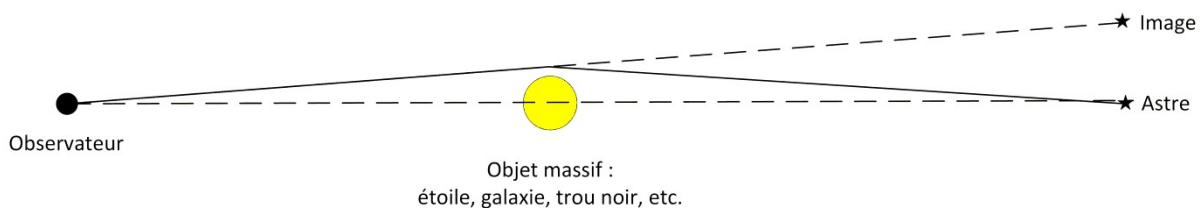
2.4.15.8 Déviation de la lumière d'étoiles par la gravité solaire

Einstein a prévu dès 1915, en publiant la théorie de la Relativité générale, que la lumière d'une étoile passant très près d'un autre astre avant d'atteindre la Terre serait déviée ; dans le cas de la lumière d'étoiles passant au ras du Soleil, ce serait de 1.74 secondes d'arc. Du fait de la guerre et du temps nécessaire à quelques autres physiciens pour comprendre la Relativité générale, il a fallu attendre le 29 mai 1919 pour qu'une vérification expérimentale ait lieu lors d'une éclipse totale de Soleil. Cette vérification eut, de par le monde, un immense retentissement [B165] : la Relativité générale, désormais vérifiée, précisait toutes les lois physiques sauf celles de la thermodynamique.

Survenant un an après la fin de la guerre mondiale, qui avait fait des millions de morts, cette coopération entre un physicien allemand (Einstein) et deux astronomes anglais (Eddington et Crommelin) était un magnifique message de paix et d'espoir.

Apprenant la nouvelle, un journaliste alla voir Einstein et lui demanda :
« Qu'auriez-vous pensé si l'expérience n'avait pas confirmé votre théorie ? »
Einstein répondit : « J'aurais pensé que Dieu s'est trompé en créant l'Univers ».

En pratique, la position de nombreuses étoiles et galaxies que nous relevons est inexacte, leur lumière étant déviée par un astre lourd ou un trou noir situé sur la trajectoire de leur image.

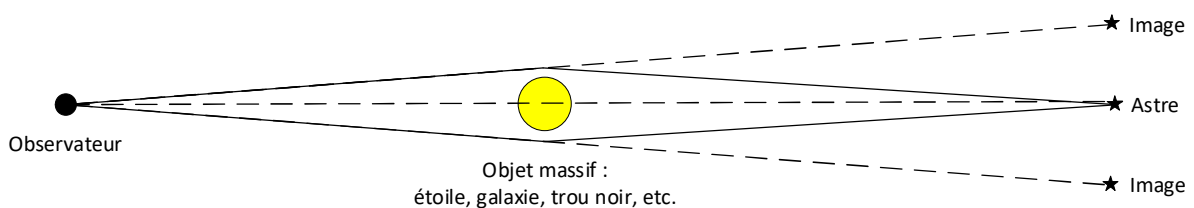


Déviation de l'image d'un astre par un objet massif

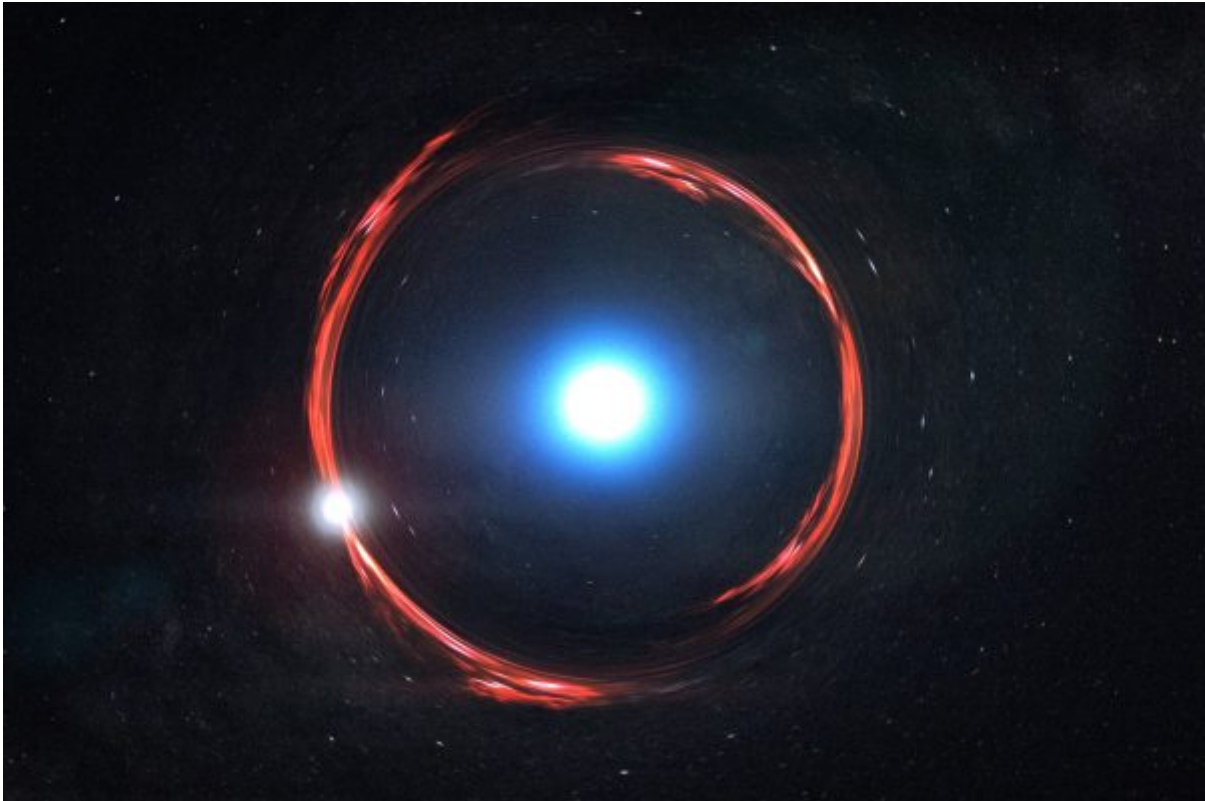
L'image de l'astre est déviée en passant près d'un objet massif : on le voit à côté de sa position réelle ; on peut même, parfois, en voir plusieurs images.

2.4.15.9 Lentilles gravitationnelles

La figure du paragraphe précédent, *Déviation de l'image d'un astre par un objet massif*, montre que si la source et l'observateur sont suffisamment éloignés de la singularité centrale, la déviation des rayons lumineux par le champ gravitationnel de la singularité peut former *deux* images de la source, l'une due aux rayons passant au-dessus, l'autre aux rayons passant en dessous.



Si en plus la source est parfaitement alignée avec un attracteur sphérique, l'observateur voit la source comme *un « anneau d'Einstein » entourant l'attracteur.*



Anneau d'Einstein © GeekMag Creative Commons

Si l'attracteur n'est pas suffisamment sphérique ou trop grand par rapport à la distance à la source, les déviations et déformations peuvent être différentes.

Amplification de la luminosité

La distorsion gravitationnelle amplifie la luminosité des images, effet précieux en astronomie où beaucoup d'images d'objets lointains sont extrêmement peu lumineuses. Cet effet est notamment utilisé pour voir une naine blanche, une étoile à neutrons ou un trou noir lorsqu'ils passent derrière un astre lourd ; il arrive alors que les deux images créées soient si proches que l'instrument d'observation ne peut les séparer et que leurs lumières s'additionnent.

2.4.16 Constante cosmologique

Voir d'abord plus haut le paragraphe *Equation d'Einstein*.

L'équation d'Einstein, écrite précédemment sous une forme concise, peut être développée pour séparer l'énergie-impulsion décrivant la matière $T^{\mu\nu}$ et l'énergie-impulsion décrivant l'espace vide $T_{vide}^{\mu\nu}$:

$$G^{\mu\nu} = 8\pi G(T^{\mu\nu} + T_{vide}^{\mu\nu}), \quad \text{où } T_{vide}^{\mu\nu} = \frac{\Lambda}{8\pi G} g^{\mu\nu} \quad \text{et } \frac{\Lambda}{8\pi G} \approx 0.7 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$$

La constante cosmologique Λ , une densité d'énergie négative

Sous cette forme apparaît un terme en Λ (prononcé "grand lambda") qui représente une *densité d'énergie négative* lorsque $\Lambda > 0$. Cette densité d'énergie existe même en l'absence de matière, c'est-à-dire dans un espace vide où la densité de matière $\rho = 0$.

Einstein a ajouté la constante cosmologique en 1917 à sa théorie de la Relativité générale de 1915, pour que son effet expansif, antigravitational $T_{vide}^{\mu\nu}$ sur l'Univers équilibre l'effet attractif du terme $T^{\mu\nu}$, produisant ainsi un espace statique.

(En 1922, le mathématicien soviétique Alexandre Friedmann abandonna l'hypothèse de l'Univers statique de la Relativité générale et montra (à partir de l'équation d'Einstein) comment l'Univers pouvait évoluer selon les densités d'énergie de la matière, du rayonnement et du vide. Voir *Equation de Friedmann décrivant l'évolution de l'Univers*.)

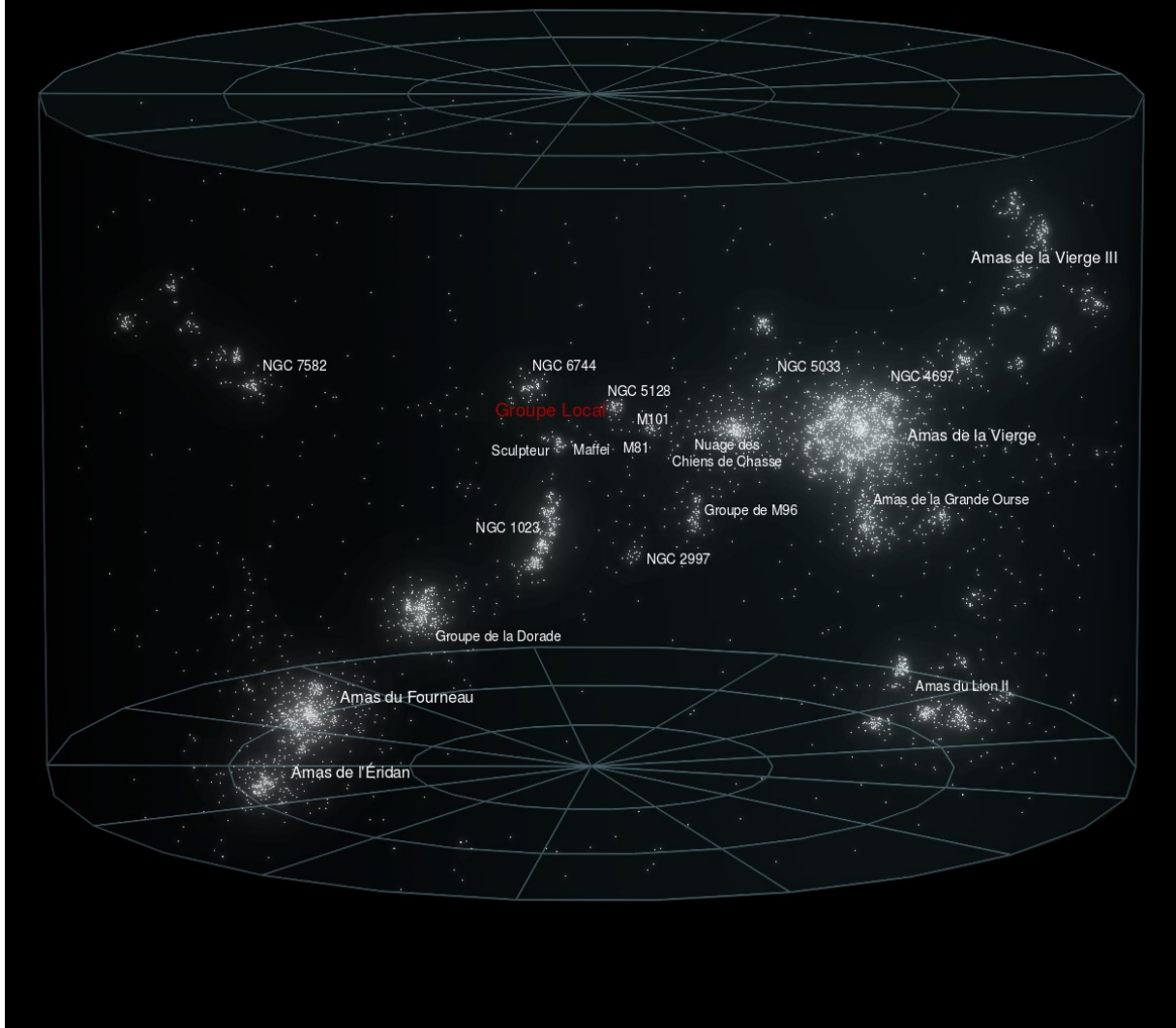
Einstein accepta les résultats de Friedmann et supprima sa constante cosmologique – à tort, car les découvertes ultérieures l'ont rendue indispensable.

Découverte expérimentalement en 1998, la densité d'énergie négative de la constante cosmologique implique une gravité négative, et une *pression de répulsion de l'espace-temps qui existe même sans masse ni rayonnement, du seul fait de l'existence de cet espace-temps*. La présence de cette constante entraîne :

- Une attraction gravitationnelle un tout petit peu plus faible qu'en l'absence de cette densité d'énergie négative, effet insignifiant en pratique à une échelle allant jusqu'aux amas de galaxies ;
- A l'échelle très grande d'un super-amas de galaxies (des centaines de millions d'années-lumière), l'existence de l'énergie noire, dont l'effet domine celui de la gravitation et qui implique une *expansion accélérée de l'Univers*.

L'énergie noire représente 73% de l'énergie totale de l'Univers, la matière noire 23% et les 4% restants la matière ordinaire : étoiles, gaz et poussière interstellaires. Nous n'avons pas, en 2018, de connaissances concernant la nature physique de la matière noire et de l'énergie noire ; seul leur effet gravitationnel est observé.

Superamas de la Vierge



Super-amas de la Vierge : environ 10 000 galaxies étalées sur 200 millions d'années-lumière et représentant environ 10^{15} masses solaires. Notre galaxie fait partie d'un amas local situé près d'une extrémité de ce super-amas entourant l'amas de la Vierge.

© Wikipedia Creative Commons.