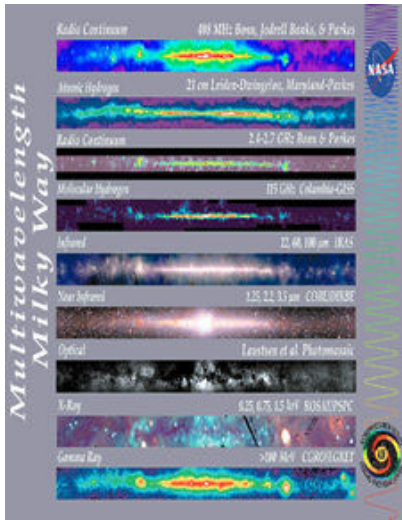


Qu'est-ce que la matière noire ?

La matière noire est une des questions ouvertes en astrophysique. Ce problème a été mis en évidence dès 1932 par Zwicky dans les amas de galaxies (Coma, Virgo). La loi de gravitation nous permet de relier la vitesse v d'un système (de dimension r) à sa masse M , selon une loi du type $v^2=M/r$. Les champs de vitesse des galaxies et amas de galaxies sont étudiés en détail, et la masse de ces objets peut en être déduite. Alors que la vitesse permet d'estimer la masse dynamique, la lumière trace en première approximation la masse "visible" contenue dans les amas et galaxies (étoile, gaz...). Il s'agit donc de deux estimations de masse indépendantes. Or, il y a un désaccord d'un facteur 10 (resp. 100) à l'échelle des galaxies (resp. amas). Une étude détaillée montre que cette matière noire domine la masse des galaxies à l'extérieur du disque optique. Pour une galaxie comme la Voie Lactée, la masse visible est répartie dans le disque (et un peu dans le bulbe) et s'étend jusqu'à 10-20 kpc, alors que la masse invisible a une distribution plus sphérique et s'étendrait jusqu'à 100-200 kpc. Comme l'illustre la figure suivante, on ne détecte pas le halo de matière noire dans aucune des longueurs d'onde où l'on observe la Voie Lactée.



Cette figure a été réalisée par la NASA (Astronomical Data Center et Astrophysics Data Facility) et est tirée du site en anglais sur la Voie Lactée :

<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw/milkyway.html>. Elle montre la Voie Lactée observée de la Terre dans différentes bandes de longueur d'onde. On voit clairement un disque (et un bulbe dans l'optique), mais aucune structure sphérique à grande échelle n'apparaît à aucune longueur d'onde i.e. on ne voit pas le halo de matière noire. On voit que la matière est répartie dans un disque (et un bulbe dans l'optique). Ces images sont projetées en coordonnées galactiques.

Qu'est-ce que cela signifie ? Soit la gravitation est faussée à ces échelles, soit il y a de la masse que l'on ne voit pas. La première piste est explorée par quelques chercheurs (Milgrom, Sanders et collaborateurs), mais semble difficile à admettre, dans la mesure où des manifestations de la loi de gravitation à ces échelles sont extrêmement bien comprises. Le phénomène de lentille gravitationnelle est le plus spectaculaire d'entre eux. À l'heure actuelle, le consensus est plutôt en faveur de la matière noire, c'est-à-dire de la matière "invisible" qui échappe à la détection. - Ainsi, la matière interstellaire qui se manifeste sous la forme d'extinction (comme le spectaculaire Sac à Charbon) est de la matière bien identifiée et détectable, et ne constitue pas de la matière noire.. On entend par matière noire (ou sombre) de la masse gravitationnelle qui n'est pas détectable avec l'instrumentation dans nous disposons. Ainsi, 90 % de la masse de la Voie Lactée est invisible, et sa nature nous est inconnue.

Pour plus d'informations sur la matière noire, voici quelques sites :

- <http://www.obs-nice.fr/bijaoui/matiere/sld001.htm>
- <http://cdfinfo.in2p3.fr/Experiences/AGAPE/MN/MN.html>
- [http://cfpa.berkeley.edu/darkmat/dm.html\(en anglais\)](http://cfpa.berkeley.edu/darkmat/dm.html(en%20anglais))
- [http://suhep.phy.syr.edu/courses/modules/SETI/TUTORIAL/bigbang2.html\(en anglais\)](http://suhep.phy.syr.edu/courses/modules/SETI/TUTORIAL/bigbang2.html(en%20anglais))
- [http://www.astro.queensu.ca/~dursi/dm-tutorial/dm1.html\(en anglais\)](http://www.astro.queensu.ca/~dursi/dm-tutorial/dm1.html(en%20anglais))

Les MACHOs, des candidats à la matière noire parmi d'autres ?

Deux types de scénarios sont envisagés pour expliquer cette masse cachée. (1) La matière noire pourrait être sous la forme de matière ordinaire ou baryonique. Les mécanismes de formation de la matière baryonique lors des premières minutes de l'univers sont bien compris, et sont connus sous le terme de nucléosynthèse primordiale. On sait que l'on produit plus de matière baryonique que ce que l'on voit, il doit donc y avoir au moins une composante de matière noire baryonique. Pour que ce type de candidat n'ait pas été détecté à ce jour, il faut qu'il soit bien caché. Ce pourrait être sous la forme d'objets compacts (ou MACHOs - Massive Compact Halo Objects) comme des naines brunes (étoiles avortées ou loupées avec une masse $M < 0.8 M_{\odot}$, i.e. des Jupiters), ou des résidus d'étoiles (naines blanches ?). Un autre candidat baryonique sérieusement envisagé est du gaz moléculaire extrêmement froid (sinon il aurait déjà été détecté), comme le propose F. Combes. (2) La seconde alternative séduisante par d'autres aspects serait que cette matière noire soit constituée de particules exotiques qui n'interagiraient pas ou très faiblement avec la matière ordinaire. Il s'agit de matière non-baryonique ou WIMPs - Weakly Interactive Massive Particules, mauviettes en français. Des bons candidats sont par exemple les particules super-symétriques qui sont aujourd'hui activement recherchées au CERN avec le boson de Higgs. Ces particules sont extrêmement difficiles à détecter, ce qui en fait de bons candidats à la matière noire, mais ne facilite pas leur détection. - Si elles constituent la matière noire, ces particules sont très abondantes, mais nous ne les voyons pas car elles interagissent très faiblement avec la matière qui nous compose, i.e. elles ne font que passer. Les recherches de WIMPs sont particulièrement ardues et exigent la mise au point de détecteurs extrêmement sensibles pour avoir une chance de détecter ces candidats à la matière noire.

Au cours de la dernière décennie, les MACHOs ont été activement recherchés. Dans cet exercice, nous allons illustrer la démarche utilisée pour détecter des MACHOs. Pour que ces objets soient de bons candidats il faut qu'ils soient extrêmement difficiles à détecter dans l'ensemble du domaine spectral. Il faut donc trouver des astuces pour les détecter indirectement. Ainsi, B. Paczynski a proposé en 1986 d'utiliser l'effet de microlentille pour détecter de façon indirecte des MACHOs. L'effet de microlentille se classe dans la catégorie des mirages gravitationnels.

Qu'est-ce que les mirages gravitationnels ?

Un des succès de la gravitation est la prédiction d'effet de lentilles gravitationnelles. -Pour avoir un aperçu plus complet, consulter le site <http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/fran/index.html>. Les rayons lumineux sont défléchis par la masse de lentilles selon les lois de l'optique gravitationnelle. La gravitation a pour effet de courber les rayons lumineux en présence de masse et ce à toutes les échelles.

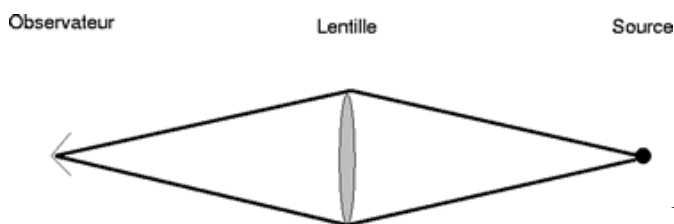


Illustration du principe de lentille gravitationnelle. La masse de la lentille défléchit les rayons lumineux de la source, ce qui produit des mirages gravitationnels.

Dans le cas, d'un alignement parfait de la source et de la lentille, on observe un anneau d'Einstein.

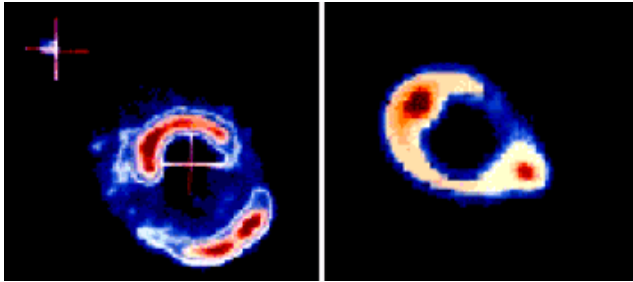
lentille = amas de galaxies ou galaxie ou MACHO

source = amas de galaxies ou galaxie ou étoile

Si une galaxie se trouve sur la ligne de visée d'un amas de galaxies, la masse de cette galaxie va agir comme une lentille gravitationnelle et va avoir tendance à focaliser les rayons lumineux de l'amas. Ces mirages gravitationnels sont observés dans de nombreux systèmes : sous

la forme d'arcs et arclets dans les amas de galaxies, sous la forme d'anneaux (d'Einstein) et d'images multiples sur des quasars et galaxies. Ce sont des effets qui ont des tailles plus importantes que la résolution (~ 1 seconde d'arc) et donc qui sont "facilement" détectables moyennant un très grand rapport signal sur bruit (et donc un grand temps de pose. - Cela demande donc beaucoup de temps de télescope et des télescopes avec une grande surface collectrice.).

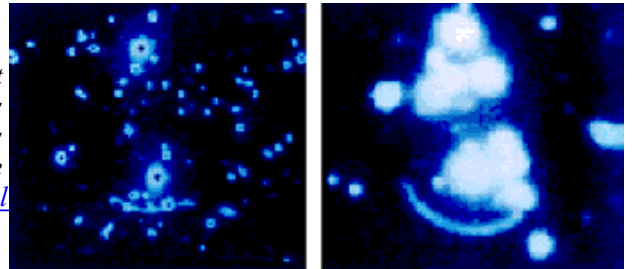
D'une part, des observations de quasars et radio-galaxies ont permis de mettre en évidence des anneaux d'Einstein, dus à la présence d'une galaxie lentille le long de la ligne de visée selon un alignement presque parfait, comme le montre les figures ci-dessous. Dans le cas d'alignement moins parfait, plusieurs images apparaissent.



Exemples d'anneaux d'Einstein observés en radio : MG 1654+ 1346 (gauche) et MG 1131+ 0456 (droite). Les rayons de la galaxie source sont défléchis par la masse de la galaxie lentille. (Observations réalisées par Langston et collaborateurs en 1989, Hewitt et collaborateurs en 1988). Ces figures sont tirées du site <http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/fran/table3.htm>

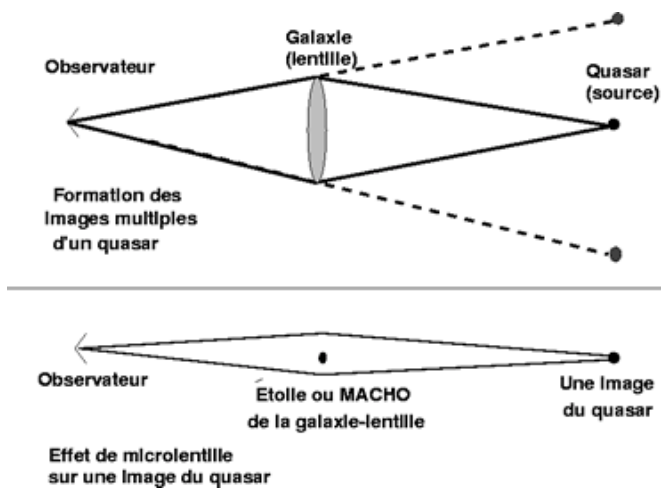
D'autres parts, dans certaines configurations, des amas agissent comme des lentilles et des arcs et arclets sont observés.

Exemples d'arcs géants détectés dans les amas Abell 370 (gauche) et Cl 2244-02 (droite). (Observations réalisées par Soucail et collaborateurs et Lynds and Petrosian durant la période 1987-89). Ces figures sont tirées du site <http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/fran/table4.html>



Par bien des aspects, les effets de lentille gravitationnelle ressemblent aux effets de lentilles optiques que l'on expérience quotidiennement. - Par exemple, des images multiples de phares de voiture sont observées en été quand la route a été chauffée durant la journée. Il y a un gradient de température dans l'air et la lumière des phares est déviée vers les couches d'air frais (plus dense)... (Voir d'autres exemples didactiques sur http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/fran/gld_homepage.html, <http://theory2.phys.cwru.edu/~pete/GravitationalLens/GravitationalLens.html>).

Si par contre, la lentille est de taille stellaire ou sub-stellaire, ces effets géométriques ($< 0.001''$) sont beaucoup plus petits que la résolution des télescopes classiques ($\sim 1''$). C'est ce que l'on appelle des effets de microlentille. Il est donc impossible de détecter des effets géométriques à ces échelles-là. Par contre, et c'est la beauté de la chose, dans ce cas de microlentilles, la lentille gravitationnelle focalise néanmoins les rayons lumineux, et ce que l'on peut détecter c'est une augmentation du flux de la source. Cette augmentation va varier en fonction du déplacement transversal de la (micro-)lentille. La signature du phénomène de microlentille est une variation du flux de la source, sur des échelles de temps pouvant aller typiquement de quelques jours à quelques années.



Cas des quasars multiples et des effets de microlentille qui peuvent affecter ses images.

Une telle configuration se produit dans le cas des quasars multiples : une galaxie lentille dédouble l'image du quasar. Si une étoile ou un MACHO de cette galaxie lentille passe devant l'une de ces images, la magnification d'une image sera décorrélée des variations intrinsèques du quasar. Cela a été observé sur quelques systèmes. Des observations de longue haleine sont nécessaires pour pouvoir conclure quant à l'origine de ces phénomènes.

Sinon un sujet à la mode est de rechercher des effets de microlentille sur des étoiles de galaxies proches et où les lentilles seraient des MACHOs du halo galactique. Ainsi, si le halo de notre Galaxie était constitué d'objets compacts (MACHO) ayant une masse de 0.01 Mo, l'observation d'étoiles dans une galaxie voisine pourrait nous permettre de mettre en évidence le phénomène de microlentilles. Par exemple, si un MACHO passe devant une étoile du Grand Nuage de Magellan (galaxie satellite de la Voie Lactée), le flux de cette étoile sera amplifié par le passage de cette lentille. - Note : le phénomène de mirage gravitationnel est proportionnel à la distance de la source (et celle de la lentille). Ainsi à l'échelle d'une galaxie, l'effet d'occultation n'est pas sensible, car les rayons lumineux sont déviés et l'amplification du flux de la source l'emporte. Si les distances qui entrent en jeu sont plutôt celles du système solaire, alors le phénomène de mirage gravitationnel sera négligeable et l'occultation l'emportera. - Dans la pratique, les objets compacts ainsi détectés pourraient également appartenir à la population du disque ou du bulbe. Cela constitue donc une méthode élégante pour détecter d'éventuels MACHOs qui se promènent entre nous et les étoiles du Grand Nuage de Magellan. Pour en apprendre plus sur le phénomène de microlentille, consulter les pages de P. Sackett (en anglais) : <http://www.astro.rug.nl/~psackett/NVWS/Microlenses.html>

Néanmoins, la probabilité de détecter un tel événement de microlentille est extrêmement faible : en observant une étoile du Grand Nuage de Magellan, on a une chance sur un million d'observer ce phénomène. Il s'agit donc de chercher une aiguille dans une botte de foin... Les personnes qui avaient envisagé le problème, il y a quelques décades, avaient conclu que cela était impossible. Aujourd'hui, avec le développement de l'outil informatique, ce travail de titan est devenu possible. Pour avoir une chance de détecter des phénomènes de microlentilles et de tester l'hypothèse que ces MACHOs constituent la matière noire, il faut être capable de suivre plusieurs millions d'étoiles pendant plusieurs années. Pour cela, il faut prendre une galaxie voisine (comme le Grand Nuage de Magellan) qui contient quelques 10 000 000 000 étoiles. Il est possible de suivre plusieurs millions d'entre elles : les étoiles *résolues*. - Il y a en fait beaucoup plus d'étoiles, car un grand nombre sont trop faibles pour pouvoir être résolues et donc détectées. Cela a été entrepris par plusieurs collaborations internationales : la collaboration australo-américaine [MACHO](#) et la collaboration française [EROS](#) ont été les pionniers. Ils ont été suivi par les collaborations américano-polonaise [OGLE](#), française [DUO](#), européenne [AGAPE](#), du pacifique [MOA](#) (Japon, Nouvelle-Zélande et Australie), américano-hollandaise [PLANET](#), américano-australienne [MPS](#), etc.

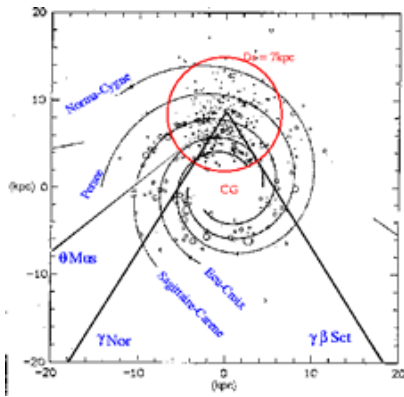
En 1993, les premiers événements de microlentille ont été détectés en direction du Grand Nuage de Magellan, démontrant ainsi le succès de la méthode. Un événement de microlentille classique est très distinctif des étoiles variables connues. Ainsi il doit être unique (à l'échelle de plusieurs générations, une chance sur un million...), il a la propriété de ne pas dépendre de la couleur (car c'est un effet géométrique), et il a la forme caractéristique présentée sur la figure. Dans la pratique, les objets compacts détectés pourraient également appartenir à la population du disque ou du bulbe. Ainsi, quelques centaines de ces événements ont été détectés, la plupart sur des étoiles de notre Galaxie comme sources et avec des étoiles de notre Galaxie comme lentilles.

Pour plus d'informations sur les groupes qui ont entrepris ces recherches, consulter leur site :

- [AGAPE1,http://cdfinfo.in2p3.fr/Experiences/Astrop/AGAPE/agape-fr.html](http://cdfinfo.in2p3.fr/Experiences/Astrop/AGAPE/agape-fr.html)
- [AGAPE2,http://www-star.qmw.ac.uk/AGAPE/](http://www-star.qmw.ac.uk/AGAPE/)
- [EROS,http://www.lal.in2p3.fr/recherche/eros/](http://www.lal.in2p3.fr/recherche/eros/)
- [MACHO,http://wwwMACHO.mcmaster.ca/](http://wwwMACHO.mcmaster.ca/)
- [MOA,http://www.phys.vuw.ac.nz/dept/projects/moa/index.html](http://www.phys.vuw.ac.nz/dept/projects/moa/index.html)
- [OGLE,http://www.astro.uw.edu.pl/~ftp/ogle/index.html](http://www.astro.uw.edu.pl/~ftp/ogle/index.html)
- [MPS,http://bustard.phys.nd.edu/MPS/index.html](http://bustard.phys.nd.edu/MPS/index.html)
- [PLANET,http://www.astro.rug.nl/~planet](http://www.astro.rug.nl/~planet)

Les lignes de visée

L'interprétation de ces événements est complexe et différentes lignes de visée sont aujourd'hui explorées. En effet, pour se convaincre de la nature des événements de microlentille déjà détectés, il faut être en mesure de pouvoir comparer différentes lignes de visée à travers notre halo. - De plus, l'exploration d'autres galaxies et leurs halos respectifs est également importante pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus sur le halo de notre Galaxie. Ainsi le halo de M 31 est aussi activement étudié.- Les directions dans le plan de la Galaxie (bulbe, bras spiraux) vont avoir des candidats avec des lentilles qui sont des étoiles de notre Galaxie. On s'attend donc à ce qu'ils aient une distribution différente que des événements dus à des MACHOs du halo de matière noire.



Vue de face de la Voie Lactée avec les bras spiraux de notre Galaxie tels qu'ils ont été détectés en HI. Figure extraite des thèses de D. Russeil et F. Derue. Le candidat que nous allons étudier a été détecté en direction de Gamma Scuti.