

# Les lentilles gravitationnelles

Ludovic Van Waerbeke, I.A.P.

ARTICLE DE FOND

Après avoir posé le problème de la masse manquante, Ludovic Van Waerbeke rappelle ce qu'est une lentille gravitationnelle puis détaille la physique de ces objets. A côté des découvertes sur les effets forts, dus aux amas de galaxies, les mesures récentes sur des effets bien moindres sont très prometteuses pour l'étude de la distribution de matière de l'Univers. Le questionnement sur la nature de la matière noire complète ce riche exposé.

## La cosmologie observationnelle aujourd'hui

Lorsqu'en 1929 l'astronome Edwin Hubble découvrit l'expansion de l'Univers en observant l'éloignement des galaxies les unes par rapport aux autres, il repoussa les limites de l'Univers à des distances inimaginables à l'époque, et marqua véritablement le début de la cosmologie moderne. Quelques dizaines d'années plus tard, un modèle standard de l'Univers a été élaboré, qui, à partir d'un nombre restreint d'hypothèses, permet d'expliquer l'ensemble des observations connues aujourd'hui, il s'agit du fameux big-bang. Malgré ses succès remarquables, il reste néanmoins beaucoup de questions sans réponse. Tout d'abord il ne s'agit que d'un modèle phénoménologique, c'est à dire qu'il contient un grand nombre de paramètres physiques dont la valeur n'est pas donnée par la théorie, et qui doivent être mesurés. C'est le cas par exemple de la constante de Hubble et de la densité de masse dans l'Univers. Une des activités principales de la cosmologie observationnelle aujourd'hui est précisément de mesurer ces paramètres afin de consolider les bases du modèle du big-

bang, et d'en vérifier la cohérence logique. Dans le même but, le cosmologiste cherche aussi à comprendre les conséquences de cette théorie sur l'Univers observable et se demande par exemple comment est distribuée la matière dans l'espace ou comment se forme une galaxie. Le problème de la mesure de la densité de l'Univers et de la distribution de matière sont donc des problèmes centraux dans la cosmologie aujourd'hui, ce seront les thèmes que nous allons développer dans cet article. On espère qu'un jour les contraintes observationnelles seront suffisamment fortes pour que le modèle soit brillamment confirmé ou alors rejeté, auquel cas il faudra alors probablement s'attaquer à des problèmes de physique fondamentale. Dans les deux cas nous aurons certainement progressé dans nos connaissances sur l'Univers !

On sait que l'Univers est composé de milliards de galaxies qui ne sont pas réparties au hasard dans l'espace : les galaxies ont une tendance naturelle au regroupement en amas, et en superamas, l'ensemble étant distribué sur une structure de type bulle de savon, où l'intérieur des bulles est

quasiment vide. On sait que cette structuration de la matière a été produite par la force gravitationnelle. A ses débuts, l'Univers était chaud, très dense et homogène : il y avait très peu de grumeaux de matière, donc pas de structures. Pendant que l'Univers poursuivait son expansion la matière s'est diluée, mais la force de gravitation a accreté de la matière a petite échelle, produisant des concentrations de plus en plus denses, aboutissant à la formation d'étoiles, de galaxies, d'amas de galaxies, puis finalement à la structure de type bulle de savon pour les plus grandes échelles. Cette description relativement simpliste est pourtant certainement fidèle à ce qui s'est passé dans l'Univers depuis une dizaine de milliards d'années : la structuration de la matière par la force de gravitation dans un Univers en expansion.

En mesurant les vitesses des galaxies par des techniques spectroscopiques, on peut théoriquement mesurer la quantité de matière responsable du mouvement observé, et ainsi en déduire la densité de l'Univers. Dès 1933, on s'est aperçu que la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements des étoiles et des galaxies était bien supérieure à la quantité de matière déduite par la lumière des galaxies, d'où le problème d'existence de matière noire. Comprendre l'origine et la distribution de cette matière est essentiel pour tester le modèle du big-bang. La masse manquante est traditionnellement détectée de manière indirecte à travers ses effets gravitationnels sur la masse visible (grâce au mouvement des galaxies). Il n'y a malheureusement que très peu de moyens d'observation directe. Une nouvelle méthode de détection directe apporte maintenant beaucoup d'espoir aux cosmologistes. Elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle.

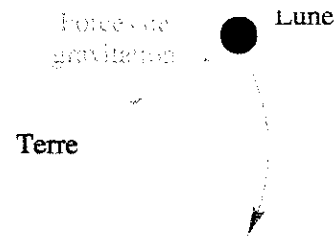
### Qu'est-ce qu'une lentille gravitationnelle?

Afin de préciser l'ensemble des phénomènes physiques regroupés sous le nom de lentilles gravitationnelles, nous allons utiliser une simple analogie avec les mirages observés sur terre. Le type de mirage qui nous intéresse est celui causé par la déformation de perception de la réalité liée au fait que la lumière ne se propage pas en ligne droite. Il peut s'agir par exemple d'une illusion dans le désert (présence à l'horizon d'une oasis ou de maisons) ou bien durant une journée très chaude d'été, l'impression que la chaussée devant nous est inondée : dans les deux cas la forte chaleur accumulée pendant plusieurs heures a réchauffé le sol jusqu'à une cinquantaine de degrés celsius. L'air immédiatement en contact avec le sol est beaucoup plus chaud que l'air situé quelques mètres au-dessus. Cette différence de température produit une différence d'indice de réfraction et la lumière se propage alors le long de trajectoires courbes. C'est ce phénomène qui nous permet de voir en plein désert une oasis ou des maisons qui sont en réalité très loin ou bien qui permet au sol chaud de réfléchir l'image du ciel.

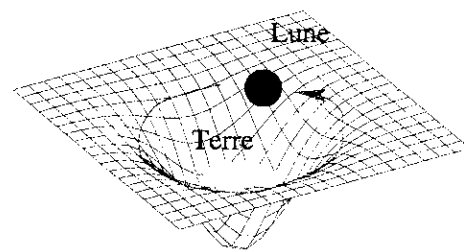
Quel est le rapport avec les lentilles gravitationnelles ?

On sait depuis les travaux d'Einstein sur la relativité générale qu'un rayon lumineux qui passe à proximité d'une masse est dévié. A cause de cet effet, la lumière ne se pro-

page pas en ligne droite dans l'Univers, ce qui peut donc conduire à des effets de mirage. La raison profonde de la déviation de la lumière par la matière vient du caractère géométrique de la relativité générale : pour Einstein, la force de gravitation n'existe pas, mais est une force fictive provoquée par la courbure de l'espace-temps qui modifie les trajectoires du mouvement de chute libre ce qui donne l'apparence de l'existence d'une "force" attractive (fig.1). Dans cette théorie, les corps massifs ainsi que la lumière suivent des trajectoires guidées par la forme géométrique de l'espace-temps.



La gravitation vue par Newton



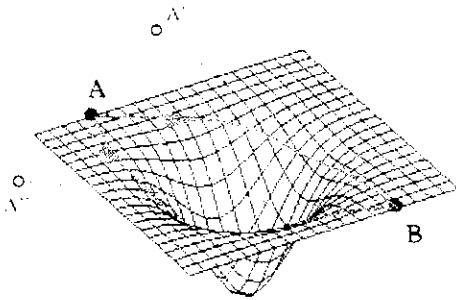
La gravitation vue par Einstein

#### Figure 1 :

La théorie de la gravitation telle qu'elle est élaborée par Newton dès le milieu du XVII<sup>e</sup> siècle postule l'existence d'une "force" attractive entre les corps massifs. Ainsi la Lune se trouve en orbite autour de la Terre car cette force l'empêche de poursuivre son élan et de s'éloigner indéfiniment. Autrement dit, la Lune n'est pas libre de son mouvement. Dans la théorie de la gravitation d'Einstein, la force n'existe plus, c'est l'espace-temps lui-même qui est courbé par la présence d'un corps massif tel que la Terre. On peut représenter l'espace courbe autour de la Terre par une toile élastique qui se déforme sous l'effet de la présence de la Terre, un peu comme la deuxième figure ci-dessus. La Lune, qui se déplace sans frottement dans cet espace est condamnée à tourner indéfiniment autour de la Terre.

D'après la relativité générale il est même possible de voir deux (ou plus) images du même objet, à condition que la

déviations de la lumière soit suffisamment importante, comme cela est montré sur la figure 2.



**Figure 2 :**

Cette illustration représente la forme qu'aurait l'espace autour d'une concentration de masse très importante comme un amas de galaxies, un peu comme le creux d'espace-temps que créait la Terre dans la fig. 1. Deux rayons lumineux partis en A (d'une galaxie lointaine par exemple) arrivent en B car leur chemin est dévié à cause de la présence de l'amas de galaxies. En B, un observateur ne verrait en principe qu'une seule image de A si la masse centrale était absente. Grâce à la courbure de l'espace créée par la masse, il voit maintenant 2 images du même objet A' et A'' qui lui semblent provenir de deux directions différentes !

Ce phénomène a été confirmé pour la première fois en 1919, lorsque l'équipe de Sir Arthur Eddington est allée au Brésil et en Afrique occidentale observer une éclipse totale de Soleil : les scientifiques ont montré que la position apparente d'une étoile derrière le Soleil pendant l'éclipse n'était pas la même que sa position habituelle lorsque le Soleil n'y est pas. L'angle de déflexion de la lumière frôlant le soleil vaut 1,75 secondes d'arc (un millième du diamètre lunaire) : il s'agissait d'un phénomène difficile à mesurer, mais néanmoins à la portée des instruments.

Ce phénomène de déviation des rayons lumineux par la matière est appelé effet de lentille gravitationnelle. Notons qu'il s'agit bien de mirages, c'est à dire que l'on a une vision déformée de la réalité, mais cette illusion est en fait très utile : en mesurant la déflexion de la lumière à proximité du Soleil, on peut en déduire... la masse du Soleil ! En effet plus le Soleil est massif, plus la déflexion de la lumière est importante, et plus la lumière passe loin du Soleil plus la déflexion est faible ; il y a une relation simple entre l'angle de déflexion, la masse et la distance au Soleil. Si  $G$  est la constante de gravitation de Newton,  $c$  la vitesse de la lumière,  $M$  la masse du Soleil, et  $r$  la distance d'approche minimale par rapport au centre du Soleil, alors l'angle de déflexion total est donné par la formule :

$$\alpha = \frac{4GM}{rc^2}$$

Dès 1920 l'astronome suisse Fritz Zwicky a compris l'importance de cette découverte, et a imaginé qu'on pourrait dans l'avenir utiliser cet effet pour "peser" l'Univers. Le terme "peser" est impropre puisqu'on doit plutôt parler de mesure de la densité moyenne de l'Univers. On voit cependant tout de suite l'intérêt pour le cosmologiste : cet outil permet potentiellement de voir la matière noire grâce aux effets de lentilles gravitationnelles qu'elle produit. Elle représente un avantage considérable par rapport à l'utilisation des vitesses comme traceur de la densité de matière : comme l'Univers est en expansion, les vitesses mesurées sur les galaxies lointaines contiennent deux composantes : l'une correspond à la vitesse induite par la gravitation locale, la composante qui permet justement de mesurer la densité de masse. L'autre est la vitesse de fuite induite par l'expansion de l'Univers. Il faut donc être capable de séparer ces deux composantes pour pouvoir mesurer la densité de masse, le problème c'est que cette séparation n'est possible que si l'on connaît la distance réelle de la galaxie, ce qui est quasiment impossible en pratique. L'effet de lentille gravitationnelle s'affranchit complètement de ce problème puisqu'il fournit une mesure absolue de la masse, que l'Univers soit en expansion ou pas.

### Les lentilles gravitationnelles dans l'Univers

Nous avons parlé de l'effet de lentille gravitationnelle du Soleil sur les étoiles lointaines, mais d'une manière générale, dans l'immensité de l'Univers, peut-on s'attendre à de tels effets à des échelles cosmologiques ?

En fait, grâce à un heureux hasard, l'Univers est rempli de mirages gravitationnels ce qui nous permet effectivement de sonder la matière noire bien au-delà de l'échelle du système solaire. Pour obtenir un effet de lentille gravitationnelle il faut avoir une source de lumière lointaine (comme une galaxie), et une lentille située entre la source et l'observateur. Comme l'Univers est très structuré, il contient beaucoup d'objets massifs entourés de vide (les galaxies, les amas de galaxies et les superamas sont des structures denses de quelques centaines de milliards à plusieurs millions de milliards de fois la masse du Soleil), il y a en fait des lentilles gravitationnelles partout.

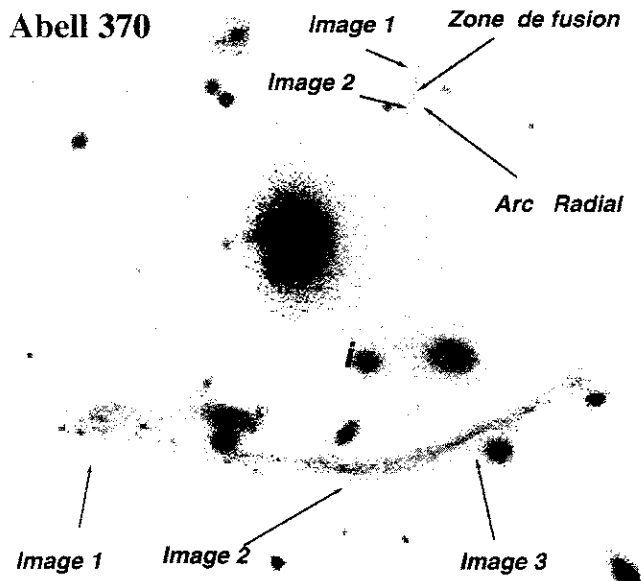
Si la source de lumière est étendue (ce qui est le cas d'une galaxie par exemple), l'effet de lentille gravitationnelle produit une image déformée de la source parce que chaque petit rayon lumineux qui en provient subit une déflexion légèrement différente de son voisin. Par exemple si la galaxie source est parfaitement circulaire, son image lentillée ressemblera à une banane allongée, on parle alors de cisaillement gravitationnel.

Le cisaillement produit par les amas de galaxies sur les galaxies lointaines peut être 100 fois plus important que celui produit par le Soleil sur une galaxie lointaine.

## La physique des lentilles gravitationnelles

### Les effets forts.

Il s'agit de l'effet de distorsion le plus remarquable : il correspond aux cas où la lentille est tellement massive que l'image de la source est complètement déformée, et dans certains cas, plusieurs images de la même source sont produites (comme l'illustre la figure 2). La déformation de l'image est telle que la galaxie lentillée apparaît comme un arc. Seuls des amas de galaxies contenant au moins un million de milliards d'étoiles (soit plusieurs dizaines de milliers de galaxies) peuvent produire de tels effets.



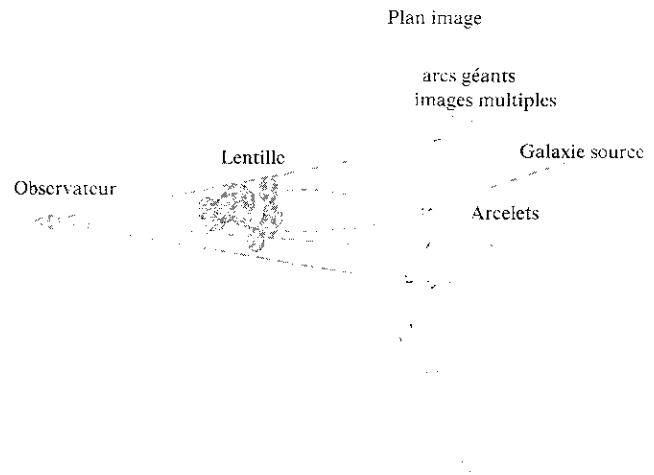
**Figure 3 :**

Un exemple d'arc gravitationnel dans l'amas de galaxies Abel 370 ( $z = 0,375$ ). On voit très bien en bas de l'image l'objet en forme d'arc très allongé : il s'agit de l'image d'une galaxie lointaine ( $z = 0,725$ ) fortement déformée par la masse de l'amas de galaxie.

La figure 3 montre le centre de l'amas Abell 370 où a été découvert le tout premier arc gravitationnel en 1987 (découverte faite à l'Observatoire de Toulouse par l'équipe de Bernard Fort). L'image de la source ne ressemble plus vraiment à une galaxie... La confirmation de l'effet de lentille gravitationnelle a été donnée par la mesure du redshift de l'arc, confirmant que l'amas est environ 2 fois plus près de nous que l'arc ! Il ne pouvait donc pas s'agir d'une galaxie appartenant à l'amas qui aurait été déchiquetée par les forces

de marées, hypothèse avancée à l'époque par certains cosmologistes pour expliquer le phénomène.

L'illustration sur la figure 4 montre la configuration lentille / source à trois dimensions dans le cas de formation d'arcs gravitationnels, comme pour l'amas Abell 370.



### Les effets de lentilles gravitationnelles : vue en 3 dimensions

**Figure 4 :**

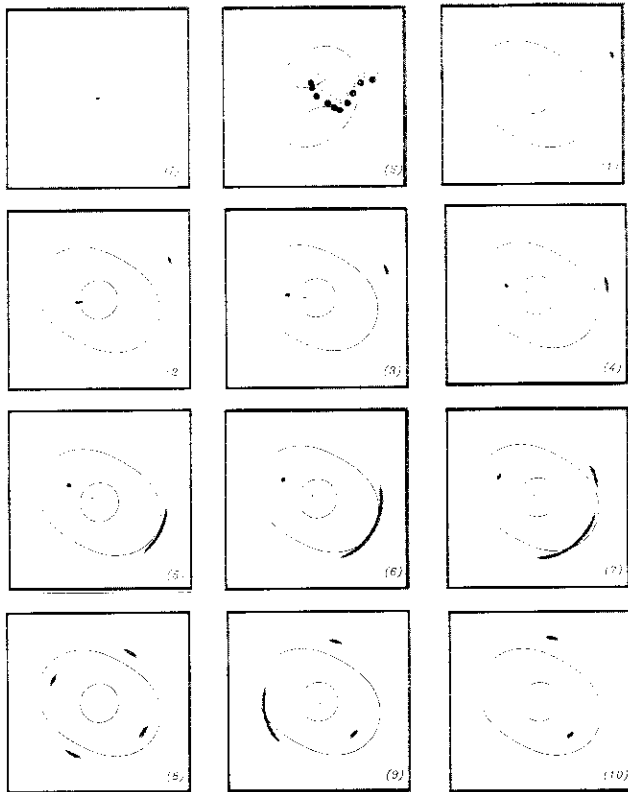
Dans ce qu'on appelle le plan image, il y a une galaxie (la galaxie source) dont la lumière est déviée par la lentille qui est ici un centre d'amas de galaxies contenant une petite dizaine de galaxies. Deux images en forme d'arc sont produites, que l'observateur peut photographier depuis la Terre.

Grâce à l'identification des arcs gravitationnels les astronomes ont pu déterminer avec précision la masse contenue dans plusieurs amas de galaxies. Bien que la relation entre la masse d'un amas et la configuration du banc optique soit beaucoup moins triviale que dans le cas du Soleil, il est facile de comprendre d'où l'on extrait l'information sur la masse.

Sur la figure 5 (page suivante) on peut voir la séquence d'effets de lentilles gravitationnelles obtenue si on pouvait bouger la source située derrière la lentille.

On voit qu'aux différentes positions de la source correspondent différentes configurations des images multiples de la source observées depuis la Terre. Comme on connaît la position angulaire de la lentille et des images ainsi que leurs redshifts respectifs, on peut renvoyer dans le plan source les différentes images de la même galaxie qui doivent alors

converger vers une seule et même image. Or cela ne marche que si on a utilisé la bonne modélisation de distribution de matière noire pour la lentille : si on choisit un mauvais modèle, alors on ne va pas retrouver que toutes les images proviennent de la même source. Les astronomes peuvent ainsi dire avec une assez bonne précision la masse contenue dans un amas de galaxies.

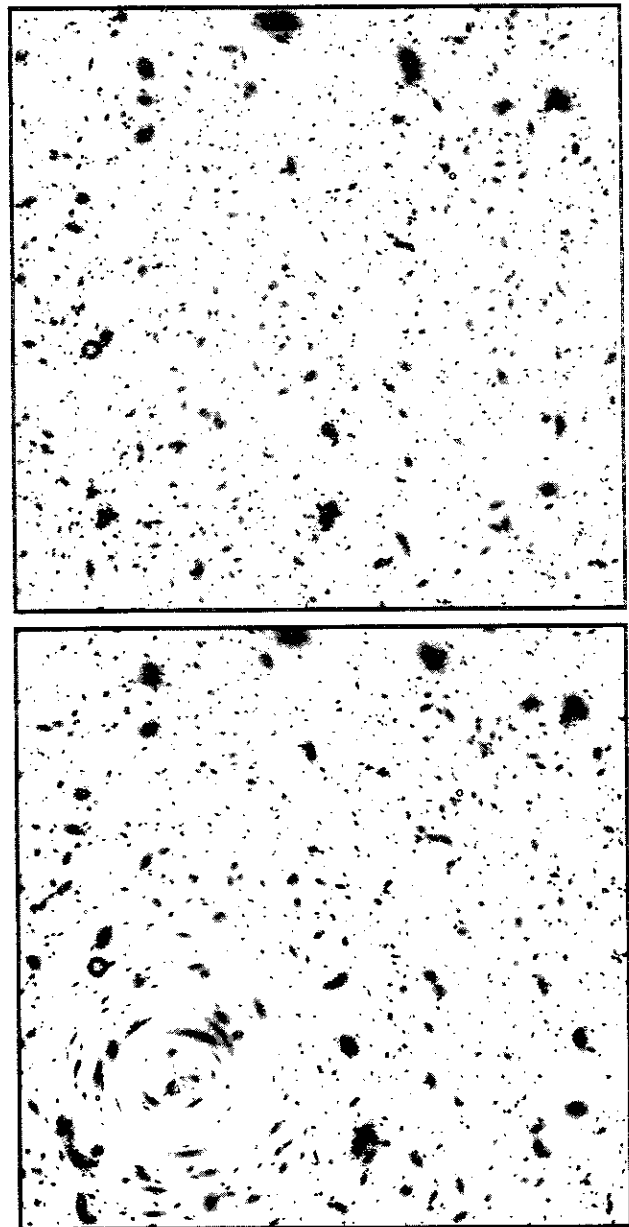


**Figure 5 :**

Cette séquence d'images (numéros 1 à 10) montre comment apparaît l'image d'une galaxie lointaine suite à un effet de lentille gravitationnelle suivant sa position par rapport à l'amas de galaxies qui constitue la lentille (qui n'est pas représentée ici). La première image (1) montre la galaxie lointaine telle qu'elle serait vue sans la lentille, et l'image (10) montre les 10 positions différentes utilisées pour générer les 10 images qui suivent.

### Les effets faibles.

Très vite les astronomes ont cherché à mesurer des effets de lentille gravitationnelle de plus en plus faibles, afin de sonder la matière de plus en plus loin des amas de galaxies, pour pouvoir voir des grumeaux de matière de plus en plus petits jusqu'à la taille d'une galaxie ! Le problème c'est que plus on s'éloigne d'un amas de galaxies, et plus l'effet de lentille devient faible, donc plus il est difficile à mesurer. On voit très bien ce qui se passe sur la simulation numérique montrée sur la figure 6.

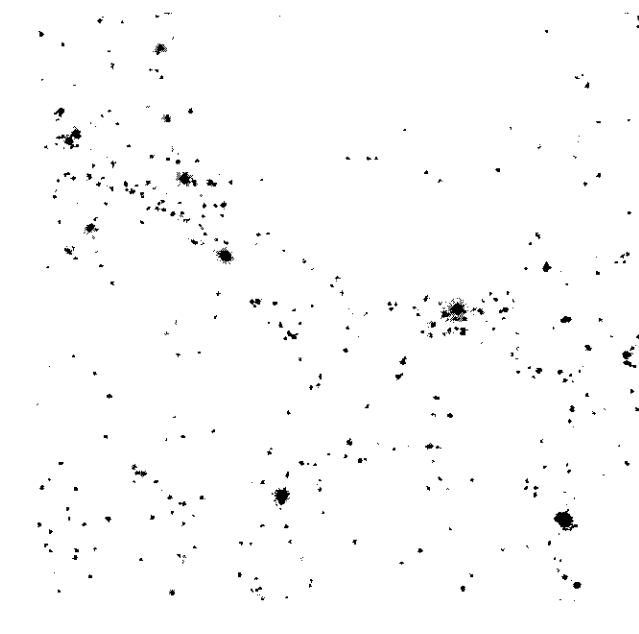


**Figure 6 :**

Ces images sont des simulations numériques qui montrent (en haut) un champ de galaxies lointaines telles qu'on pourrait les voir si on ne place pas de lentille gravitationnelle devant, et en bas, le même champ de galaxies lointaines vue à travers un amas de galaxies très massif. Cet amas (qui n'est pas dessiné ici) est situé en bas à gauche de l'image du bas, et on voit facilement que juste autour du centre les galaxies lointaines sont fortement déformées, puis plus on s'éloigne du centre de l'amas et moins l'effet de lentille gravitationnelle est fort, donc moins les galaxies sont déformées. En bordure du champ, en haut à droite de l'image du bas, les galaxies ne sont presque pas déformées.

Près de l'amas de galaxies (qui n'est pas représenté sur la figure), les galaxies lointaines sont fortement distordues, donnant lieu à la formation d'arcs gravitationnels, on se

retrouve dans le cas précédent des effets forts. Plus loin de l'amas (vers le haut à droite) l'effet est trop faible pour être identifié à l'œil sur un seul objet. On ne peut le mettre en évidence que par une étude statistique qui consiste à mesurer la forme moyenne d'un grand nombre de galaxies : c'est par cette méthode qu'on arrive à montrer que les galaxies lointaines sont de préférence alignées les unes par rapport aux autres, trahissant la présence de matière, un peu comme la limaille de fer trahit la présence d'un champ magnétique en s'alignant le long des lignes de champ.



**Figure 7**

Cette simulation représente une tranche d'Univers de 100 Mégaparsecs de côté. Il s'agit d'une représentation en négatif : les zones les plus denses en matière sont foncées. Les gros noeuds de matière à l'intersection des filaments sont des amas de galaxies. La mesure des effets de lentille gravitationnelle à grande échelle devrait permettre d'obtenir des cartes de masse de l'Univers telle que cette simulation.

Cet effet, prédit il y a une dizaine d'années, n'a été mesuré pour la première fois que l'année dernière, et confirmé simultanément par 4 équipes internationales. L'une de ces équipes est celle de Yannick Mellier basé à l'Institut d'Astrophysique de Paris, qui a fait sa découverte grâce au télescope Franco-Canadien-Hawaïen de 3,6 mètres installé au sommet du Mauna-Kea à Hawaï. On peut maintenant étudier la distribution de matière dans l'Univers, non seulement dans les amas massifs de galaxies, mais aussi partout ailleurs ! Les mesures récentes de cet effet nous ont déjà permis de mesurer la densité moyenne de l'Univers et de confirmer certains résultats obtenus précédemment par la mesure de la distribution des galaxies et du fond de rayonnement cosmologique. Cette concordance de résultats est bien sûr une très bonne nouvelle pour le big-bang. Mais il est évident

qu'à terme l'intérêt de la méthode est la cartographie de la matière noire à toutes les échelles. Il est probable que les premiers résultats arriveront d'ici 2 ou 3 ans. En attendant, il faut se contenter de simulations numériques, qui sont par ailleurs indispensables pour comprendre et résoudre les difficultés techniques qui ne manqueront pas d'arriver. Les zones du ciel que l'on cherchera à cartographier couvriront un millier de fois la surface apparente de la Lune, ce qui sera très gourmand en temps de télescope.

La figure 7 montre une simulation du résultat attendu : si les modèles cosmologiques actuels sont corrects, on s'attend à trouver que la matière est distribuée sous la forme d'une mousse de savon, avec de grosses concentrations que sont les amas, des longs filaments et murs de matière entre eux, et des grandes bulles de vide ailleurs.

### **Des télescopes de plus en plus gros et de plus en plus hauts**

L'observation de ces effets nécessite de gros moyens observationnels. Pour cartographier de grandes zones du ciel, il faut que le champ du télescope couvre au moins un degré carré, ce qui suppose que l'on sache construire de grandes caméras CCD. Au télescope Franco-Canadien-Hawaïen de 3,6 mètres, il y aura dans 2 ans une caméra de  $18000 \times 18000$  pixels pouvant couvrir le degré carré du foyer primaire. Les Very-Large-Telescopes installés au Chili, de 8 mètres de diamètre, ne seront pas en reste, une fois qu'une caméra grand champ y sera installée, probablement cette année. Tout un ensemble de nouveaux télescopes de la classe des 8 mètres va se lancer dans ce programme dans les années à venir, mais la révolution la plus spectaculaire viendra probablement des futurs télescopes spatiaux. Parmi eux, le NGST (New Generation Space Telescope, prévu pour 2009) sera un télescope spatial de 6 mètres et pourra observer en 10 minutes ce qu'un télescope au sol de 8 mètres pourra faire en une heure. Mais il aura un champ relativement petit, et ne pourra observer des effets de lentilles gravitationnelles qu'à petite échelle. On s'attend cependant à observer des effets de lentille gravitationnelle partout sur le ciel, grâce à son puissant pouvoir collecteur, et cela devrait révéler que les effets de lentille gravitationnelle forts existent partout dans l'Univers, à condition de pouvoir regarder assez profond en redshift.

Il y a aussi un projet de télescope spatial de 2 mètres, en orbite autour de la Lune avec un champ de un degré carré qui révolutionnera probablement notre vision de l'Univers lointain car il devrait être destiné à faire un relevé complet du ciel jusqu'à des magnitudes de l'ordre de 28 ou 30. Ce dernier instrument devrait être lancé après 2010.

### **Conclusion : qu'est-ce que la matière noire ?**

Observer la matière noire ne dit pas ce qu'est la matière noire. Les effets de lentille gravitationnelle sont produits par toute forme de matière sans distinction sur sa nature (neutri-

nos, leptons, baryons, etc...). Si l'on veut avoir une connaissance physique de l'Univers, il est essentiel de connaître également la nature de ses constituants. Ce dont on est quasiment certain aujourd'hui c'est que la matière noire ne peut pas être sous forme de matière ordinaire (c'est-à-dire la matière qui constitue tout ce qui nous entoure et qui a été observée dans les accélérateurs de particules : protons, neutrons, électrons, quarks, etc...). On peut estimer de manière très précise la quantité de matière ordinaire. Voici comment : à l'origine l'Univers était trop chaud pour permettre aux noyaux atomiques d'exister, car à peine formés, ils étaient immédiatement cassés par des collisions avec des photons ou des particules énergétiques. A cette époque l'Univers était une soupe homogène de photons, de quarks, de leptons et d'autres particules élémentaires. En se dilatant, il s'est refroidi, et les protons et neutrons ont pu se former sans être détruits par le bain de particules environnantes. Juste après, les premiers noyaux atomiques ont pu se former, mais seuls les noyaux les plus légers ont eu le temps de se former (hydrogène, hélium, lithium, béryllium et bore) avant que l'Univers ne devienne trop froid et trop dilué pour permettre des interactions efficaces pour la formation de noyaux plus lourds. Cette histoire nous a amené à quelques minutes après le big-bang : c'est la nucléosynthèse primordiale. Certains des éléments légers ainsi formés ne peuvent pas être créés de manière stable dans les étoiles (deutérium, hélium 3 et lithium 7), donc la mesure de leur densité actuelle nous renseigne directement sur l'abondance de ces éléments au moment de la nucléosynthèse. Ces éléments sont véritablement des reliques de la physique de l'Univers primordial, et des traceurs de la matière ordinaire. Or il se trouve que l'on a mesuré avec précision l'abondance de ces éléments : on connaît donc avec la même précision la quantité de matière ordinaire présente dans l'Univers. Grande surprise pour les cosmologistes : le maximum de matière ordinaire autorisé est presque 10 fois plus faible que le minimum de matière noire mesuré par les effets de lentille gravitationnelle ! Si les effets de lentille gravitationnelle sont incapables de nous dire ce qu'est la matière noire, ils nous apprennent au moins ce qu'elle n'est pas : de la matière ordinaire.

Nombre de physiciens spéculent aujourd'hui sur ce que pourrait être cette matière inconnue. Il faut se tourner vers la physique des particules de haute énergie pour avoir quelques indices. Il s'agit de la branche de la physique qui traite de l'interaction des particules à des énergies proches de celles qui régnaient dans l'Univers primordial. Si une matière inconnue existe vraiment, elle doit jouer un rôle important dans ces interactions. On ne peut pour l'instant que spéculer sur ce que seraient les lois physiques à de telles énergies aussi élevées car nous ne savons pas encore les produire dans nos accélérateurs de particules : l'identité de cette nouvelle matière reste au-delà de nos capacités d'investigation.

Certaines théories prédisent depuis longtemps l'existence de particules exotiques. C'est le cas par exemple de la "supersymétrie" (inventée dans les années 70) qui postule que toute particule ordinaire posséderait un double dont toutes les propriétés quantiques seraient identiques sauf une

liée à son moment cinétique intrinsèque (le spin). Certains de ces "doubles supersymétriques" seraient stables et beaucoup plus massifs que leurs partenaires ordinaires : ce sont de bons candidats comme constituants de la matière noire. L'intérêt de la supersymétrie pour les physiciens est avant tout théorique : cette théorie présente un haut degré de symétrie et de simplification comparée à toutes les autres, et elle résout un grand nombre de difficultés en physique des particules. Si la supersymétrie s'avère exacte cela représentera une avancée dans notre compréhension de la Nature au moins aussi importante que la découverte des interactions faible et forte (forces responsables respectivement de la radioactivité et de la cohésion des protons). La cosmologie est pour l'instant l'unique moyen de tester le zoo de ces théories physiques fondamentales, mais pour peu de temps en ce qui concerne la supersymétrie : l'accélérateur de particules du Fermilab (Chicago) – qui a découvert il y a six ans le dernier membre des familles de quarks prédits par la théorie standard – pourrait d'ici 2 ans atteindre les énergies requises pour voir des effets indirects de la supersymétrie. Un événement important attendu avec impatience.

A l'opposé, la jeune théorie des supercordes, qui a l'ambition d'unifier mécanique quantique et relativité générale, est probablement encore pour plusieurs siècles très loin de nos domaines d'investigation expérimentaux, mais elle fait des prédictions sur l'Univers primordial dont certaines peuvent être directement testées à l'aide de la cosmologie observationnelle. Pour donner un ordre de grandeur, il faudrait atteindre des énergies de l'ordre de mille milliards de fois celles obtenues dans les meilleurs accélérateurs actuels pour tester la théorie des supercordes directement, soit l'équivalent d'un accélérateur linéaire de particules qui traverserait notre galaxie. Nous entrons dans une période d'exploration passionnante où l'observation de l'Univers (effets de lentille gravitationnelle, fond de rayonnement diffus, distribution des galaxies, rayonnement X, radio et millimétrique, etc...) et la physique des particules ont des préoccupations de plus en plus proches, et où chacune a beaucoup à apprendre dans son propre domaine grâce à l'autre.

#### **Note :**

Je remercie Francis Bernardeau et Jean Paul Kneib pour l'emprunt de certaines figures, ainsi que Benoîte Pfeiffer pour sa lecture critique du manuscrit.

#### **Pour en savoir plus :**

"L'Univers et la lumière. Cosmologie classique et mirages gravitationnels",  
par Laurent Nottale, éd. Champs Flammarion.  
"Chronique de l'espace-temps : du vide quantique à l'expansion cosmique",  
par A. Mazure, G. Mathez, Y. Mellier, B. Fort, éd. Masson.  
"Les mirages gravitationnels"  
par Christian Vanderriest, CC n° 18.