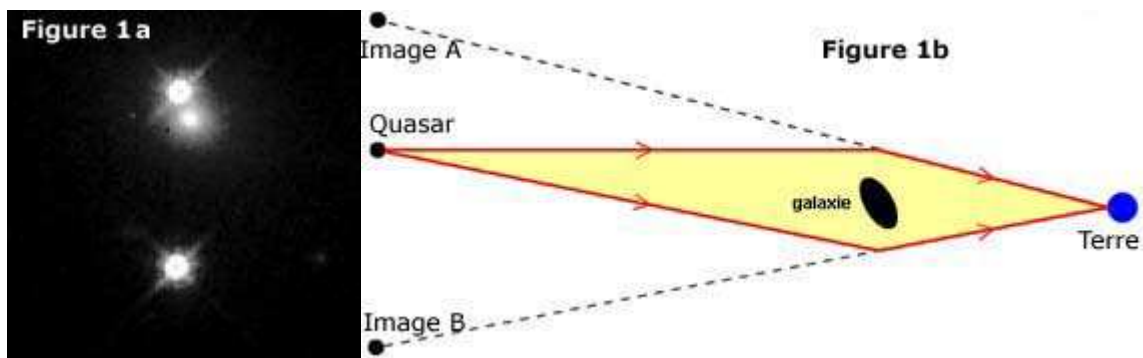


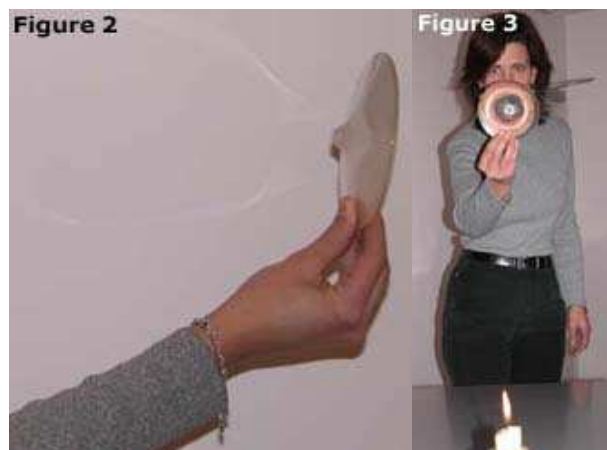
Simulateur de mirages gravitationnels

Une expérience didactique proposée
par Réjou**sciences** (Faculté des Sciences, Université de Liège)

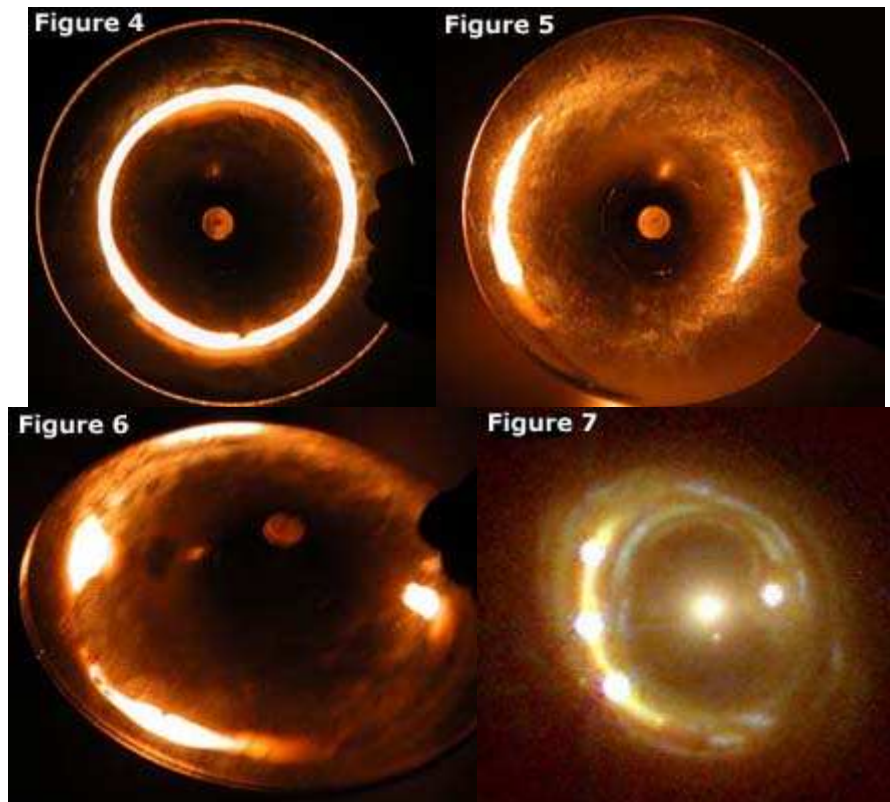
En 1979, trois astronomes anglo-saxons, Walsh, Carswell et Weymann ont découvert par hasard dans le ciel le premier exemple de mirage gravitationnel, une illusion à l'échelle cosmique, composé de deux images brillantes d'un quasar d'arrière-plan (un noyau actif de galaxie), formées par une lentille gravitationnelle d'avant-plan (une galaxie massive ; Figures 1a et 1b).



La formation de tels mirages cosmiques avait été prédite dans le cadre de la relativité générale élaborée en 1917. Suivant cette théorie, Einstein prévoit que les rayons lumineux émis par une source d'arrière-plan sont déviés au voisinage d'une masse suffisamment compacte interposée le long de la ligne de visée, comme celle d'une étoile, d'une galaxie ou encore d'un amas de galaxies. Dès lors, une grande concentration de masse peut agir comme une sorte de lentille, appelée lentille gravitationnelle. Une expérience didactique simple permet de simuler de tels effets. La lentille en plexiglas (Figure 2) a été fabriquée de façon telle que celle-ci dévie les rayons lumineux d'une source d'arrière-plan (cf. une ampoule de lampe de poche, la flamme d'une bougie,...) avec les mêmes propriétés qu'un astre compact possédant une masse équivalente à environ $2/3$ celle de notre Terre; ce serait le cas d'un trou noir ayant très exactement une telle masse. Ainsi, en plaçant cette lentille en plexiglas de 15 cm de diamètre à bout de bras, parfaitement alignée avec la source d'arrière-plan (Figure 3), l'observateur peut apercevoir un magnifique anneau de lumière, communément appelé anneau d'Einstein (Figure 4).



Lorsque les conditions d'alignement ne sont plus parfaites, l'anneau se brise en deux images (Figure 5). Celles-ci correspondent plus ou moins aux deux images du premier mirage gravitationnel découvert en 1979 (Figure 1a). Lorsqu'on introduit une anisotropie dans la distribution de la masse du défecteur, en inclinant légèrement la lentille en plexiglas, on obtient alors un nombre d'images encore plus élevé de la source d'arrière-plan (Figure 6). Une telle configuration d'images superposée à un anneau d'Einstein a été observée dans le bestiaire des astres cosmiques (cf. le mirage gravitationnel RXJ1131 récemment découvert par des astrophysiciens liégeois ; Figure 7).



Jean Surdej & Anna Pospieszalska
Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie, Université de Liège

**Article en quatre parties paru dans *Le Ciel,*
le bulletin
de la Société Astronomique de Liège**

**Jean et Anna Surdej
Adaptation : André Lausberg**

Texte traduit et adapté par André Lausberg, à partir des références suivantes :

"Gravitational lenses", par Sjur Refsdal et Jean Surdej, paru dans les *Reports of Progress in Physics*, 56 (1994) pp.117-186.

"Gravitational Lensing" par Jean Surdej et Jean-François Claeskens,
écrit pour le livre intitulé *The Century of Space Science*.
Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2001)

Rappelons également le site internet où l'on peut trouver des compléments
d'informations et de nombreuses images :
http://vela.astro.ulg.ac.be/grav_lens/

Les mirages gravitationnels (I)

Préambule

En 1983 déjà, et en 1993, ont eu lieu à Liège deux Colloques Internationaux d'Astrophysique, sur le thème des lentilles gravitationnelles. C'est dire que plusieurs chercheurs de notre Institut sont particulièrement actifs dans ce domaine depuis de nombreuses années.

Nous présentons ici, en version française, un premier extrait des documents disponibles sur Internet, à l'adresse http://vela.astro.ulg.ac.be/grav_lens/

Ces pages ont été rédigées par Jean Surdej et son épouse, Anna Pospieszalska-Surdej, en collaboration avec un pionnier de ces recherches, Sjur Refsdal de l'observatoire de Hambourg. La version intégrale, en anglais, est intitulée « Didactical experiments on gravitational lensing » et est destinée aux étudiants et aux chercheurs intéressés par le sujet.

Les mirages atmosphériques peuvent déformer de manière significative notre vision des objets terrestres distants; ce phénomène est dû aux variations de l'indice de réfraction des couches d'air situées juste au-dessus du sol. D'une manière analogue, les phénomènes de mirages gravitationnels perturbent notre vision de l'univers lointain, et affectent notre compréhension de la physique de diverses catégories d'objets extragalactiques.

Après avoir rappelé les principes qui sont à la base des mirages atmosphériques et gravitationnels, nous décrirons une expérience d'optique simple, qui peut rendre compte de tous les types de configurations d'images observés jusqu'à présent dans les systèmes de lentilles gravitationnelles. Envisageons d'abord le cas le mieux connu de tous, celui des mirages atmosphériques.

Introduction: les mirages atmosphériques

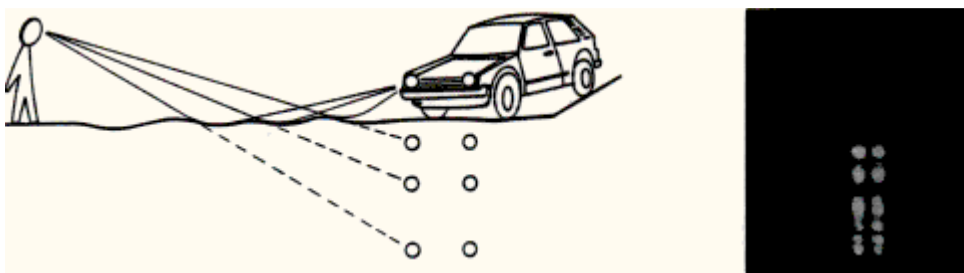


Figure 1: Propagation des rayons lumineux au-dessus d'un sol surchauffé, entre une voiture distante et un observateur (à gauche), et formation d'images multiples dues à un mirage atmosphérique (à droite).

Une représentation schématique des chemins suivis par les rayons lumineux, émis par une voiture distante, est donnée dans la figure 1 (à gauche). L'air au ras du sol est plus chaud que celui situé à des niveaux supérieurs, et la réfraction entraîne toujours une courbure des rayons lumineux vers les régions les plus froides et donc les plus denses. Dès lors, plusieurs images, quelque peu déformées, peuvent être observées en bas de l'image principale, à partir de cette source distante. La figure 1, à droite, montre les images multiples des phares d'une voiture située à environ

16 km de l'observateur. Cette photo a été prise dans la nuit du 11 janvier 1989, à l'aide d'un appareil de 200 mm de distance focale, le long de la route reliant les villes de Magdalena et Datil, près du grand télescope VLA (Very Large Array). Celui-ci appartient au NRAO (National Radio Astronomical Observatory) situé à Socorro, au Nouveau Mexique (USA).

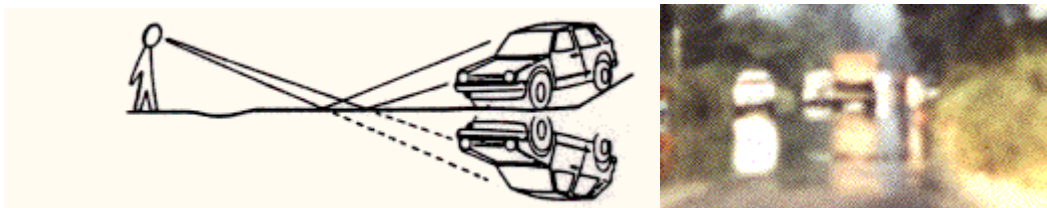


Figure 2: Propagation des rayons lumineux au-dessus d'un sol surchauffé (à gauche) et formation de deux images (l'une directe, l'autre inversée) d'une voiture distante, suite à un mirage atmosphérique (à droite).

De tels mirages terrestres, habituellement constitués de deux images simples (Figure 2 à gauche), peuvent en fait être observés quasi quotidiennement. On vient de voir que ce phénomène peut affecter de manière significative notre vision des sources terrestres, en gardant les détails de l'image mais en la déformant et en la multipliant. Mais en plus, le mirage atmosphérique provoque fréquemment une amplification de la lumière reçue à partir d'objets lointains dont on ne distingue plus les détails. Ce fut le cas, par exemple, quand nous avons regardé à l'oeil nu le mirage atmosphérique illustré en Figure 1. Les phares de la voiture apparaissent alors comme consistant en un spot très brillant ... anormalement brillant pour une voiture située à quelque 16 km de nous.

La Figure 2 montre les observations faites par les auteurs le long d'une longue ligne droite, sur la grand route baptisée North Panamerican, entre les villes de Pichidanguí et La Serena au Chili, le 2 décembre 1987. On voit nettement une image plus basse, inversée et quelque peu déformée de la voiture lointaine.

Des exemples similaires sont observables sur une plaine très étendue. Les Figures 3 et 4 correspondent à deux vues différentes de diverses antennes individuelles du grand télescope VLA. Les photos ont été prises très tôt le matin, le 17 janvier 1989, quand l'air chauffé par le soleil levant était plus chaud que le sol, ce qui entraîne soit une déformation des images, comme sur la Figure 3, soit la formation de mirages avec images supérieures, comme celle que l'on voit nettement sur l'image de droite de la Figure 4.

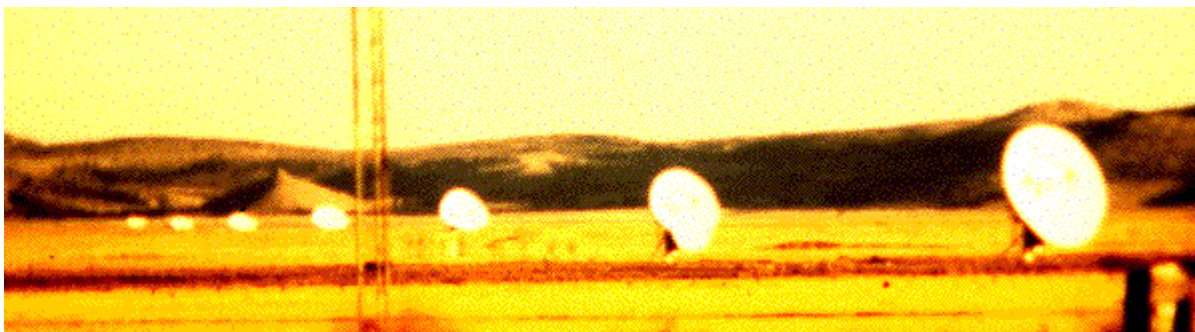


Figure 3: Images déformées des antennes du VLA, situées sur le bras nord-sud, prises tôt le matin du 17 janvier 1989.



Figure 4: Images déformées et multipliées de quelques antennes du VLA, prises le 17 janvier 1989. A noter l'image supérieure, nettement détachée de l'antenne de droite.

Description physique du phénomène

La déformation et/ou la multiplication des images peut s'expliquer à partir d'un modèle simple, en se donnant une loi $n(z)$ pour la valeur de l'indice de réfraction n en fonction de la hauteur z , comme représenté sur la partie gauche de la Figure 5. Sur la partie droite du graphique, on a dessiné la trajectoire du rayon partant d'un des points de l'antenne et aboutissant à l'oeil de l'observateur, dans le cas où l'air est plus chaud près du sol. L'angle i entre la tangente à la trajectoire et la direction horizontale est représenté ici pour l'instant de départ du rayon.

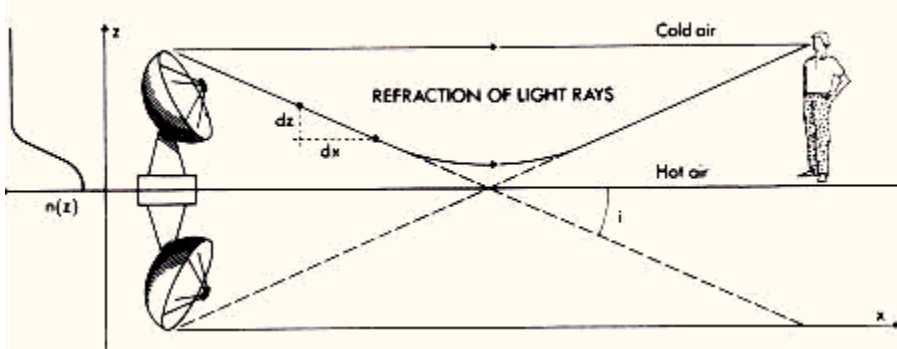


Figure 5: Formation de mirages atmosphériques à travers une atmosphère caractérisée par un indice de réfraction variable avec l'altitude

En appliquant la loi de Descartes dans le cas d'un milieu d'indice de réfraction variable $n(z)$, on calculera numériquement la loi de variation $i(x)$ donnant l'inclinaison de la tangente en tous les points de la trajectoire du rayon lumineux. On pourra ainsi déterminer le chemin suivi pour chaque rayon lumineux issu de l'antenne. Dans certaines circonstances, dépendant de la loi $n(z)$ et de la distance de la source, on trouvera que plusieurs trajectoires sont possibles entre l'antenne et l'observateur, ce qui permet la formation d'images multiples.

Une description plus détaillée de cette méthode peut être trouvée sur le site Web indiqué en préambule de cet article. Il s'agit de l'exercice 1, intitulé « Physical description of atmospheric lensing », préparé à l'intention des étudiants utilisant le langage de programmation Basic ou Fortran, et qui veulent effectuer des simulations numériques du phénomène.

On mentionnera deux autres résultats importants obtenus par cette méthode:

* Dans le cas d'images multiples d'un même point source, un délai temporel peut apparaître entre les diverses trajectoires, d'une part à cause de la différence des longueurs parcourues, et d'autre part parce que la vitesse de la lumière varie en fonction de l'indice de réfraction suivant la loi $v=c/n(z)$.

* Le mirage atmosphérique peut fournir des images dont la surface apparente est supérieure à celle observée directement sur la source, en l'absence de mirage. On montre que l'intensité spécifique, autrement dit la quantité de lumière par unité de surface, est conservée quand les images sont déformées. On en déduit que, pour des images agrandies par effet mirage, une amplification de la quantité de lumière est mise en évidence.

Dans le cas des mirages gravitationnels, dont la cause est radicalement différente de celle des mirages terrestres, on retrouvera néanmoins l'ensemble des propriétés qui viennent d'être décrites.

Les mirages gravitationnels (II)

Histoire d'une découverte

Dans un article introductif paru dans notre bulletin de septembre 2000 ("Le Ciel" - Bulletin de la Société Astronomique de Liège, Vol. 62, p.199) nous avons décrit les mirages atmosphériques. Ceux-ci présentent en effet de nombreux points communs avec les mirages gravitationnels, dont l'étude passionne depuis plus de 20 ans les astrophysiciens. C'est en effet en 1979 que, par un heureux hasard, une image double d'un quasar fut découverte. Depuis lors, des dizaines d'images multiples de quasars ont été accumulées, et leur étude théorique a permis d'obtenir de précieux enseignements à la fois sur les sources de rayonnement, à savoir les quasars, ainsi que sur les déflecteurs * galaxies ou amas de galaxies * qui dévient la lumière de ces mêmes quasars. Par ailleurs, de nombreuses questions intéressant la cosmologie ont pu être approchées d'une manière entièrement nouvelle. Citons une détermination indépendante de la constante de Hubble et la distribution des masses visibles ou cachées dans l'Univers.

Cette moisson extraordinaire de résultats, qui fait augurer d'autres découvertes majeures, a été précédée de spéculations théoriques nombreuses et variées, bien avant même l'avènement de la théorie d'Einstein.

***Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action strongest at the least distance?
(Isaac Newton 1704)***

Ainsi, dès le début du XVIII^e siècle Newton s'interroge sur l'action possible exercée par des corps massifs sur la trajectoire de la lumière. C'est que le savant anglais considérait la lumière comme pouvant être constituée de grains élémentaires, que l'on appelle aujourd'hui «photons» et qui, selon lui, devaient être attirés par les corps massifs, à l'instar des particules de matière. Il questionne donc avec prudence: «Pourquoi les corps n'agiraient-ils pas à distance sur la lumière, en sorte que par leur action ils courberaient les rayons; et cette action ne serait-elle pas plus forte à courte distance?».

Au fond, en suivant ce raisonnement, la seule différence entre d'une part une comète qui est déviée en passant près du Soleil, et d'autre part un grain de lumière rasant notre étoile, c'est que ce grain de lumière est doté d'une vitesse bien supérieure (dans ce contexte, on ne se préoccupe pas trop de savoir si le «photon» a une masse ou pas ...).

Le calcul de cette déviation, dans le cadre de la mécanique newtonienne, a été effectué par l'astronome Soldner en 1804, à l'observatoire de Munich. La déviation trouvée, pour un rayon passant au bord du Soleil, est de 0,875 seconde d'arc. Cependant, durant les XVIII^e et XIX^e siècles, ni la conjecture de Newton ni le résultat de Soldner ne furent pris au sérieux, car c'est une description de la lumière en termes d'ondes qui prévalait, par opposition à une description en termes de particules.

La question va resurgir dans un tout autre contexte au début du XX^e siècle, avec l'élaboration de la théorie de la Relativité Générale. Einstein postule qu'un objet massif comme le Soleil doit courber l'espace-temps dans son voisinage et que toute particule, massive ou non (comme les photons lumineux) doit alors se mouvoir le long d'une «géodésique» de cet espace-temps courbé. Il prédit dès 1915 qu'un

rayon lumineux passant au ras du Soleil doit être dévié d'un angle égal à 1,75 secondes d'arc, soit exactement le double de la valeur calculée par Soldner.

Rappelons la célèbre formule d'Einstein, que l'on trouve dans tous les livres de Relativité Générale. L'angle de déviation est donné en fonction de la masse M_{Sol} du Soleil et de son rayon R_{Sol} par:

$$\alpha = 4GM_{\text{Sol}}/(c^2R_{\text{Sol}}) = 1.75''$$

valeur que l'on retrouve sans peine à l'aide d'une calculette, en se rappelant la valeur de la constante de Newton $G = 6.67 \times 10^{-11}$ (en unités MKS) et celle de la vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8$ m/s. (NB: le rapport est un nombre sans dimension, dès lors l'angle est obtenu en radians, et 1 radian = $2 \times 10^5''$).

Pour départager les théories de Newton et d'Einstein, il suffisait en principe de photographier une portion du ciel entourant le Soleil lors d'une éclipse totale, et de comparer ce cliché à celui obtenu en photographiant les mêmes étoiles en l'absence du Soleil. Ce fut fait pour la première fois en mai 1919 et 6 mois plus tard, par Eddington et ses collaborateurs. L'angle de déviation prédit par Einstein fut confirmé, bien qu'avec une précision médiocre puisque l'inexactitude était de 20 à 30 %. Néanmoins, ce résultat excluait le résultat classique, confortait la nouvelle théorie d'Einstein, et confirmait d'une manière indiscutable le concept suivant lequel la lumière subit une déviation dans un champ gravitationnel.

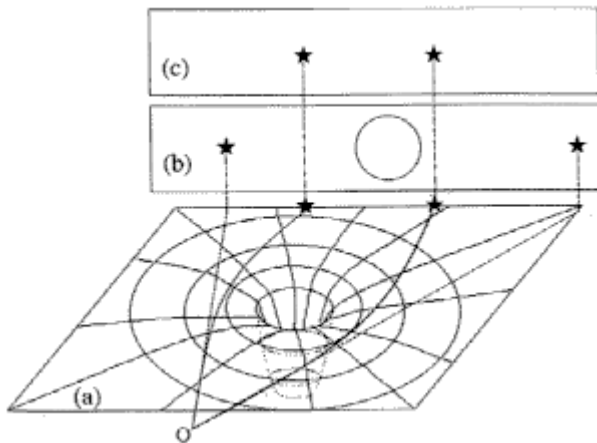


Figure A. - Dans la partie (a) du schéma, les courbures induites par la masse centrale d'une étoile sont figurées sur un espace à deux dimensions, censé représenter l'espace-temps courbé à 4 dimensions. Les rayons provenant des deux étoiles sont attirés vers le centre. L'observateur placé en O attribue donc aux deux étoiles les positions indiquées sur la partie (b), au lieu de les voir comme sur la partie (c). Le champ des étoiles est donc dilaté par cet effet de lentille.

Concernant la piètre précision de l'expérience d'Eddington, on rappellera que les observations ont été reproduites lors d'éclipses ultérieures du Soleil, et que les incertitudes ont été réduites à moins de 1 %, grâce aux méthodes radio interférométriques et à l'observation de sources lointaines et ponctuelles (les quasars) en lieu et place des étoiles. Il semble qu'Eddington fut le premier, en 1920, à proposer la formation possible d'images multiples d'une étoile lointaine, par suite de l'effet de lentille gravitationnelle dû à une autre étoile se trouvant à l'avant-plan. Mais on note que dès 1919, Lodge avait comparé un objet massif comme le Soleil à une lentille, tout en remarquant que cette lentille ne possédait pas de réelle distance focale (Ndlr: voir plus loin la simulation de lentilles gravitationnelles à l'aide de lentilles optiques particulières).

En 1923, Frost, alors directeur du Yerkes Observatory, voulut lancer un programme de recherches d'images multiples pour les étoiles de notre galaxie, mais les observations ne furent jamais effectuées.

En 1924, Chwolson suggéra l'idée de la formation d'une image annulaire, ceci dans le cas d'un alignement parfait entre l'observateur et deux étoiles situées à des distances différentes.

La notion d'amplification de la quantité de lumière reçue apparaît en 1933, quand Etherington démontre que le phénomène de lentille gravitationnelle préserve l'intensité spécifique (quantité de lumière par unité de surface et d'angle solide) des ondes électromagnétiques. Il est dès lors facile d'établir que l'amplification de la source est tout juste égale au rapport entre la surface de l'image observée, et celle que l'on obtiendrait si le phénomène de lentille n'avait pas lieu, autrement dit la surface du disque réel de l'étoile source. On peut prendre comme exemple la surface de l'« anneau de Chwolson », laquelle peut être de loin supérieure à celle de l'étoile vue en ligne directe.

Albert Einstein, en 1936, a redécouvert indépendamment des autres chercheurs les caractéristiques principales des lentilles gravitationnelles, notamment les doubles images que l'on pourrait obtenir si la lumière d'une étoile était déviée par une autre étoile. Il décrit également le phénomène de l'anneau, appelé depuis lors « anneau d'Einstein » ... Mais l'inventeur de la Relativité Générale demeura fort sceptique quant à la possibilité d'observer le phénomène de lentille à partir d'étoiles.

Sur base de notes manuscrites d'Einstein, on a pu récemment, en 1997, constater que durant le printemps de 1912, soit trois ans avant d'achever sa théorie de la gravitation, son auteur avait établi la théorie complète de la formation d'images multiples, y compris le phénomène d'amplification. Il semble donc qu'Einstein, en 1936, avait complètement oublié ses travaux de pionnier sur le sujet, réalisés 23 ans auparavant ...

C'est en 1937 que Franz Zwicky * a réalisé qu'il y avait une très grande probabilité d'identifier un « mirage » grâce aux lentilles gravitationnelles, c'est-à-dire d'observer plusieurs images distinctes du même objet, visibles depuis le sol. Il était question cette fois d'objets extragalactiques et non plus d'étoiles de notre galaxie. Zwicky proposa même d'utiliser les galaxies d'avant-plan comme des télescopes cosmiques naturels afin d'observer des objets du ciel profond, qui autrement seraient trop faibles pour être visibles. Il insista également sur la possibilité de « peser » les galaxies distantes, grâce à une simple application de la loi de déviation de la lumière, tout en réalisant un test de la Relativité Générale.

Zwicky écrivait en 1937: « la probabilité que des nébuleuses galactiques agissant comme des lentilles gravitationnelles soient découvertes devient pratiquement une certitude ». Il était d'ailleurs très surpris de noter 20 ans après, en 1957, qu'aucun effet n'avait encore été découvert grâce au télescope de 200 pouces du Mont Palomar.

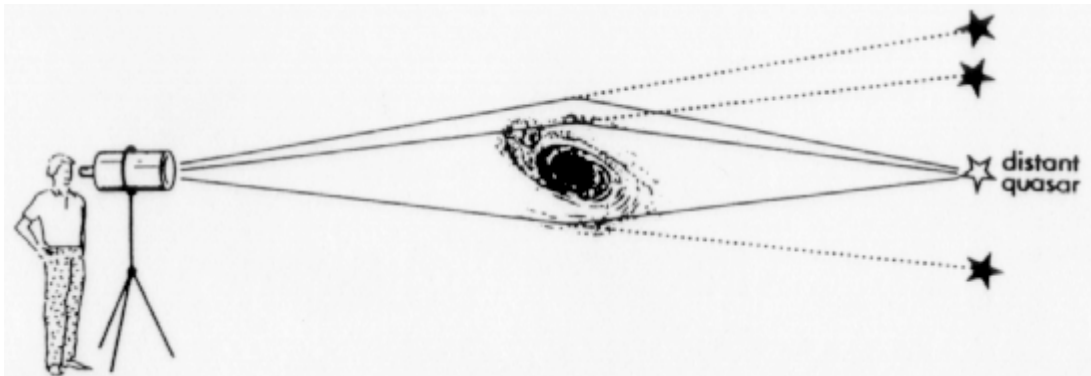


Figure B. Inflexion des rayons lumineux par la gravitation. Un observateur voit les différentes images d'un quasar lointain, suivant les directions des rayons lumineux qui lui parviennent, et qui ont été déviés par une galaxie massive interposée. Le rayon supérieur passe dans le vide à l'extérieur de la galaxie; il est donc attiré par toute la masse de celle-ci. Par contre les deux autres rayons traversent le disque galactique et sont déviés seulement par la masse centrale.

Près d'un quart de siècle se passa avant que l'intérêt pour la théorie des lentilles gravitationnelles ne soit ravivé, à propos de l'effet lentille dû aux galaxies ou aux étoiles, ou encore concernant les applications cosmologiques possibles (cfr les travaux de S. Refsdal, docteur honoris causa de notre université). Certaines des applications proposées étaient particulièrement riches de promesses, à cause de la découverte des quasars par M. Schmidt en 1963. Ces objets extrêmement distants, très lumineux et d'aspect stellaire baptisés aussi QSO (Quasi Stellar Objects) allaient sans doute, mieux que des images de galaxies étendues et diffuses, permettre d'identifier des images multiples d'un même objet.

La recherche théorique se poursuivit durant les années 70, bien qu'à un rythme plus lent, et les prévisions toujours plus précises n'incitaient pourtant pas les observateurs à développer une recherche systématique de lentilles gravitationnelles.

C'est finalement 42 ans après la prédiction de Zwicky que le rêve de quelques astronomes devint réalité. C'est avec pas mal de chance que Walsh, Carswell et Weymann découvrirent en 1979 le premier exemple d'un quasar dont l'image est dédoublée par une galaxie du champ, jouant le rôle de lentille gravitationnelle. L'objet, appelé Q0957+561 A & B, consiste en deux images séparées sur le ciel de 6 secondes d'arc. Plusieurs arguments plaident en faveur de la double image d'un seul objet, à savoir:

- on note la similarité entre les spectres (les « empreintes digitales »)

- les légères différences entre les images optique et radio s'expliquent par un modèle simple

- on a pu observer la galaxie faisant office de lentille

- un délai temporel a été mesuré entre les arrivées des deux rayons, en se basant sur les variations de lumière de la source, et en tenant compte des différents chemins parcourus. Ces mêmes observations ont conduit à une première détermination indépendante de la constante de Hubble ($*\text{km/sec/Mpc}$).

A partir de cette découverte de pionniers, tant les observations que les travaux théoriques ont connu une croissance remarquable. En 1983, le Colloque international de Liège fut la première conférence dédiée officiellement à la reconnaissance et à l'étude des mirages gravitationnels. A cette époque encore, une majorité d'astrophysiciens ne reconnaissaient pas la vraie nature de ces joyaux du ciel. En 1993, lors d'un autre Colloque international de Liège, consacré également aux mirages cosmiques, plus de 1000 articles étaient parus sur le sujet. Le domaine des lentilles gravitationnelles constitue aujourd'hui une branche nouvelle et indépendante de l'astronomie extragalactique. En témoigne l'histogramme de la figure C qui rend compte de l'accroissement des publications scientifiques au cours des 20 dernières années, avec un total approchant les 3000 articles!

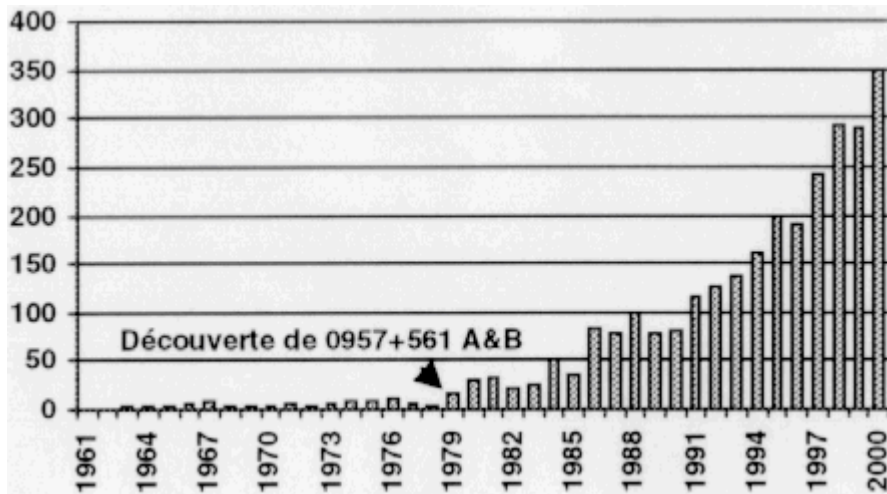


Figure C. Nombre d'articles publiés par année à propos des lentilles gravitationnelles, avant et après la découverte du quasar dédoublé Q0957+561 A & B

Plus de 50 images multiples de quasars sont aujourd'hui reconnues comme telles; elles concernent une grande variété de phénomènes allant des images multiples légèrement amplifiées à d'immenses arcs lumineux (cf photo de couverture), en passant par l'anneau d'Einstein, et sans oublier le phénomène de micro-lentille applicable aux étoiles... Il ne fait aucun doute qu'un lien intime existe entre la courbure de l'espace-temps et le phénomène de lentille gravitationnelle, et que ce lien est présent à toutes les échelles et en tous les points de l'univers. Grâce aux nouvelles technologies et aux missions spatiales déjà programmées pour le siècle prochain, notre compréhension physique du cosmos ne pourra que s'accroître sans cesse.

*** Astronome suisse inventeur notamment de la "masse manquante" dans les amas de galaxies.**

Les mirages gravitationnels (III)

Dans un premier article, publié dans Le CIEL de septembre 2000, nous avons décrit certains effets de mirages atmosphériques dus à la variation de l'indice de réfraction de l'air au voisinage du sol surchauffé. On obtenait notamment la multiplication des images d'une source distante, leur déformation et leur amplification.

La théorie de la Relativité Générale d'Einstein prévoit que les rayons lumineux sont déviés au voisinage d'une masse suffisamment compacte, comme celle du Soleil, d'une galaxie ou d'un amas de galaxies. Dès lors, une grande concentration de masse peut agir comme une sorte de lentille, appelée lentille gravitationnelle. Dans le bulletin de novembre, nous avons décrit l'histoire de cette découverte, à la fois du point de vue de la théorie et aussi des observations.

Dans ce troisième article, nous reviendrons plus en détail sur le phénomène de lentille gravitationnelle, en insistant sur les effets qu'il est possible d'observer. Ensuite, nous présenterons une expérience de lentille optique, permettant de simuler en laboratoire les phénomènes réellement observés dans l'Univers.

Il sera dès lors très intéressant de comparer une série d'images obtenues soit par simulation, soit par observation directe.

Nous terminerons par un aperçu des autres résultats pouvant être déduits de ces observations, à savoir la détermination de la constante de Hubble, ainsi que celle de la distribution des masses dans des régions traversées par les rayons lumineux émis par les quasars lointains.

Action des lentilles gravitationnelles

Dans le cas des rayons provenant d'étoiles lointaines et rasant la surface du Soleil, nous avons vu que la déviation produite était de l'ordre de deux secondes d'arc. L'angle de déviation étant directement proportionnel à la masse du « déflecteur » et inversement proportionnel à son rayon, on peut s'attendre à trouver une déviation du même ordre de grandeur dans le cas d'une galaxie comme la nôtre, dont la masse est quelques centaines de milliards de fois celle de notre Soleil, et dont le rayon de la partie centrale est également quelques centaines de milliards de fois plus grand que le rayon du Soleil. Dans le cas de déflecteurs constitués par des amas de galaxies, on atteindra des déviations de l'ordre de quelques dizaines de secondes d'arc.

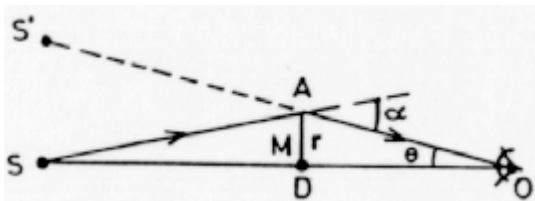


Figure 1: Dans le cas d'un alignement parfait de la source S, du déflecteur D et de l'observateur O, une masse M produit, sur un rayon passant à une distance r du centre du déflecteur, une déviation mesurée par l'angle α . Si l'observateur peut

voir le déflecteur, il mesure alors un écart angulaire θ entre d'une part ce déflecteur (et donc aussi la source réelle S) et l'image reçue de la source S'.

Comme on l'a vu dans le cas du Soleil, l'angle de déviation α est donné par:

$$\alpha = \frac{4G}{c^2} \frac{M}{r}$$

L'écart angulaire θ peut être calculé successivement dans les triangles ODA et OSA, en tenant compte du fait que les angles sont très petits (la tangente peut alors être égale à l'angle exprimé en radians). On obtient:

$$\theta = \frac{r}{D_{OD}} \text{ et } \theta = \frac{D_{DS}}{D_{OS}} \alpha$$

Dans le cas envisagé ici, celui de l'alignement parfait des trois points S, D et O, et si les conditions sont réunies pour que le rayon représenté sur le schéma atteigne effectivement l'observateur, il en sera de même dans tous les plans contenant la droite SDO: autrement dit, l'observateur verra un anneau circulaire centré sur le déflecteur. C'est ce qu'on appelle l'« anneau d'Einstein » dont la dimension dépend de l'écart angulaire θ_E . Le carré de cet écart est obtenu à partir des trois formules précédentes:

$$\theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{DS}}{D_{OD} D_{OS}}$$

Envisageons un cas simple, celui d'une source S située environ deux fois plus loin que le déflecteur, une situation qui a de bonnes chances d'être réalisée de temps à autres dans notre univers. Dans ce cas $D_{DS} \approx D_{OD}$ et la formule d'Einstein devient:

$$\theta_E^2 \approx \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{D_{OS}} \approx \frac{2GM}{c^2} \frac{1}{D_{OD}}$$

On voit donc que le carré du rayon angulaire de l'anneau d'Einstein est proportionnel à la masse du déflecteur, et inversement proportionnel à la distance entre la source et le déflecteur.

Prenons deux exemples numériques: pour une galaxie-déflecteur plus massive que la nôtre, distante de 3 milliards d'années-lumière, et dont le noyau central contient l'équivalent de mille milliards de masses solaires, avec un noyau de rayon égal à environ 15.000 années-lumière, le rayon θ_E de l'anneau d'Einstein vaut deux secondes d'arc.

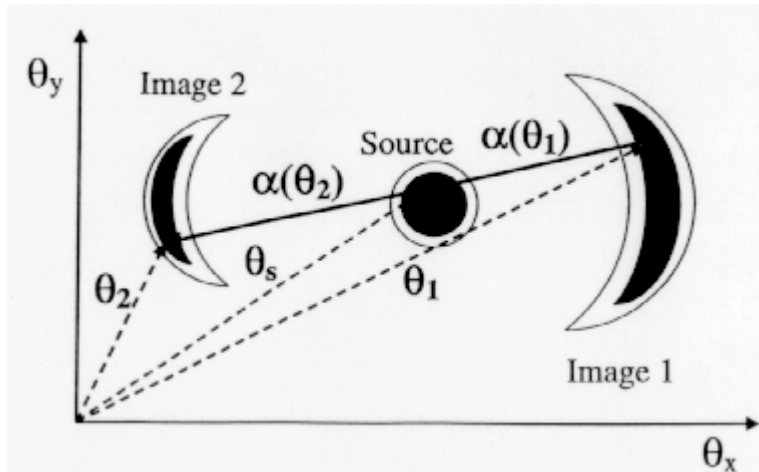


Figure 2: Les observations sont ici décrites dans un plan (θ_x, θ_y) perpendiculaire à la ligne de visée. En l'absence de déflecteur, la source serait vue à une distance angulaire θ_s de l'origine (choisie arbitrairement), sous forme d'un double disque.

Suite à la présence du défecteur, on voit deux images 1 et 2, lesquelles ont subi des déviations correspondant à deux valeurs différentes de l'angle α . La surface totale de ces deux images est supérieure à la surface du disque central.

Pour un amas de galaxies contenant cent fois plus de masse, et placé à la même distance, avec un rayon de 300.000 années-lumière, $\theta \sim 20$ secondes d'arc. Ce sont les ordres de grandeur que nous annonçons au début de cet article.

La possibilité d'observer l'anneau d'Einstein est bien sûr extrêmement faible. Par contre, les cas d'un alignement approximatif entre la source, le défecteur et l'observateur sont beaucoup moins rares. La figure 2 illustre cette situation, dans laquelle des fragments d'anneaux sont observés.

L'effet du défecteur est donc à la fois de dédoubler l'image, de la déformer, et de produire deux images dont la surface totale, et donc aussi le flux observé, est supérieur à celui de l'image non déformée. Il y a donc un phénomène d'amplification que l'on peut calculer et aussi mesurer sur les clichés.

Remarquons que dans le cas de l'anneau d'Einstein, la surface totale de l'anneau est également supérieure à la surface de la source vue sans déviation; il y a donc amplification du flux observé. D'une manière générale, ce phénomène d'amplification, a priori très étonnant, s'explique par le fait que l'observateur reçoit des rayons lumineux qui normalement seraient parvenus dans d'autres régions; la lentille gravitationnelle ne fait donc que redistribuer les rayons d'une manière différente entre les différentes régions où les observateurs sont susceptibles de se trouver.

L'exemple illustré ci-dessus correspond à une des nombreuses possibilités d'images résultant de l'action des lentilles gravitationnelles. Dans une étude plus complète, sortant du cadre de cet article, il faudrait d'abord considérer un défecteur avec une répartition de masse diffuse, au lieu d'une masse ponctuelle; dans ce cas, il serait nécessaire de remplacer dans les formules précédentes la masse totale M du défecteur par une fonction $M(r)$ correspondant à la masse déviant le rayon lumineux passant à la distance r du centre du défecteur. Ensuite, il faudrait abandonner le modèle d'un défecteur à symétrie sphérique, afin de mieux rendre compte de la forme d'une galaxie ou d'un amas de galaxies qui dévient les rayons lumineux.

Simulation des mirages gravitationnels par des lentilles optiques

Il existe une technique relativement simple, permettant de produire en laboratoire, à partir d'une source ponctuelle, une grande variété d'images multipliées, déformées et amplifiées.

Le but étant d'imiter au mieux l'action gravitationnelle qu'une masse exerce sur un rayon lumineux, on construira une lentille capable de dévier la lumière suivant la même loi, c'est-à-dire avec un angle de déviation diminuant avec la distance par rapport à l'axe optique. Il ne peut évidemment pas s'agir d'une lentille convergente ordinaire, car dans ce cas les rayons sont d'autant plus déviés qu'ils sont au départ éloignés de l'axe optique, ce qui permet d'ailleurs de focaliser ces rayons vers un seul point (Figure 3).

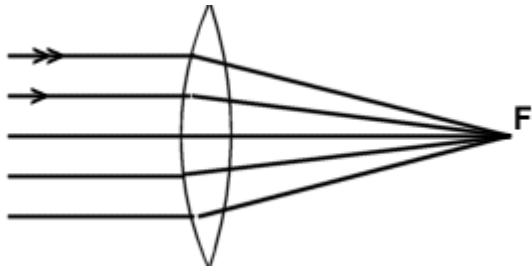


Figure 3: Dans une lentille optique convergente, les rayons arrivant sur la lentille, parallèlement à l'axe optique, sont d'autant plus déviés qu'ils sont éloignés de cet axe.

Il faut donc rechercher un système optique capable de dévier les rayons pour les rapprocher de l'axe optique, par exemple en raison inverse de leur distance à cet axe, dans le cas d'un défecteur ponctuel, ou suivant une loi plus compliquée, si l'on veut imiter l'action des défecteurs possédant une répartition de masse diffuse. On choisira d'abord le plus simplement des lentilles optiques à symétrie axiale, et possédant une face plane. L'autre face aura une surface calculée en fonction de la loi de déviation souhaitée.

Rappelons-nous l'histoire de l'oeuf de Colomb: pour faire tenir un oeuf immobile, avec son grand axe vertical, il suffit de casser l'oeuf (dur) sur une pointe. La première découverte d'une «lentille optique- gravitationnelle» a dû se faire lors d'une soirée bien arrosée, un des convives gardant en main le pied d'un verre brisé, et s'en servant pour regarder la flamme d'une bougie!?

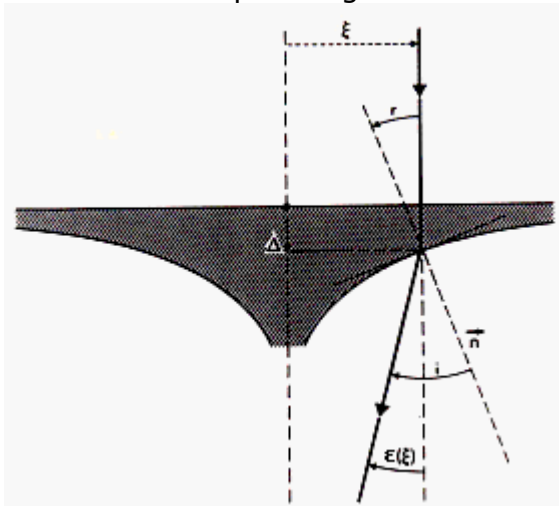


Figure 4: Déviation d'un rayon lumineux, parallèle à l'axe optique à une distance ξ . Le rayon quitte la surface inférieure en s'écartant de la normale; la déviation $\epsilon(\xi) = i - r$ dépendra de la forme de cette surface inférieure. Dans cet exemple, on peut voir que la déviation diminue quand le rayon incident s'éloigne de l'axe optique.

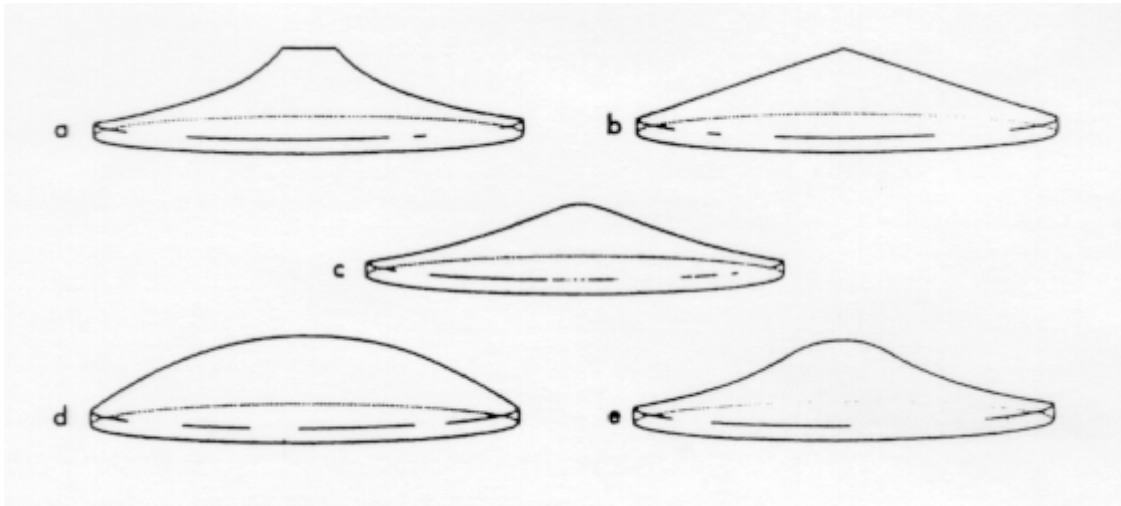
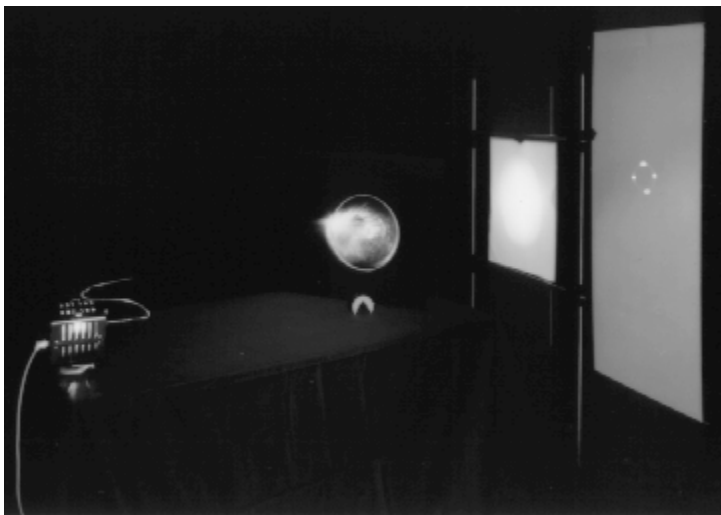


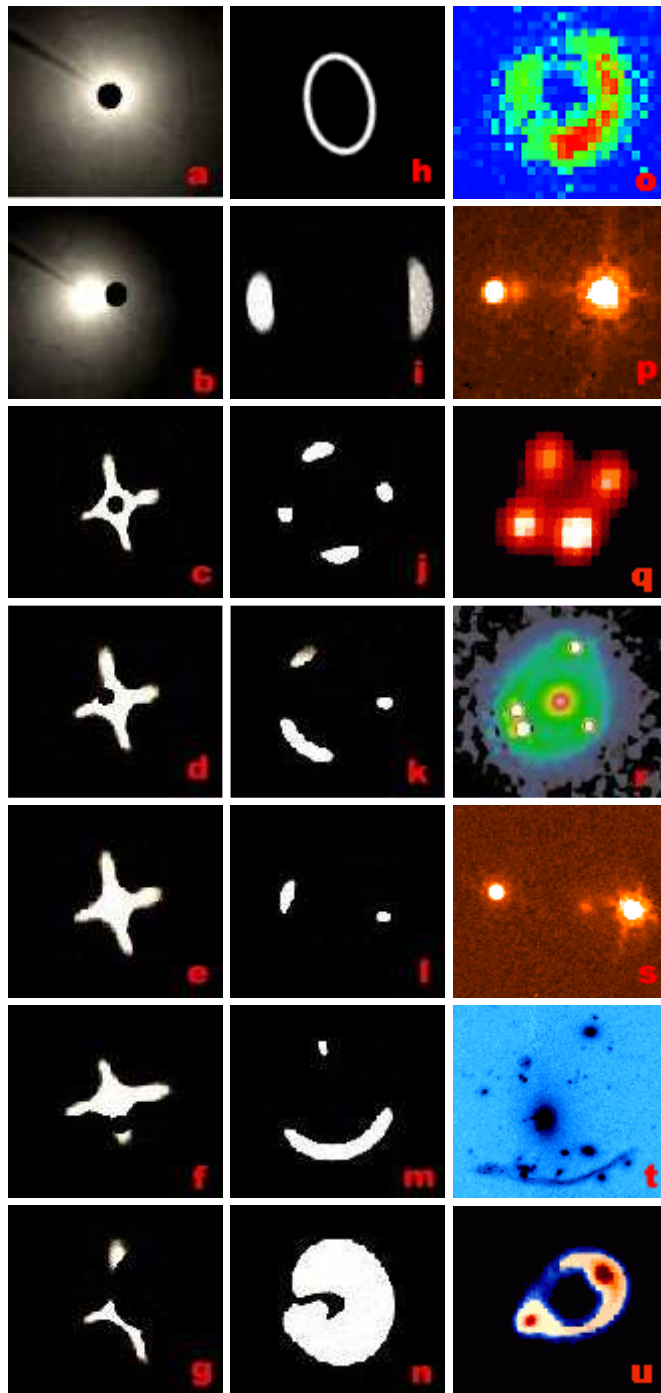
Figure 5: Exemples de lentilles optiques à symétrie axiale, permettant de simuler les déviations de rayons lumineux produites par une masse ponctuelle (a), une sphère isotherme (b), une galaxie spirale (c), un disque uniforme (d) et un disque uniforme tronqué (e)

La figure 4 nous montre cette lentille en forme de pied de verre à vin, avec un rayon venant du haut, à une distance donnée de l'axe optique. Suivant la loi de Descartes, le rayon sortant s'écarte de la normale à la surface courbe. Il suffit dès lors de calculer la forme de la surface de manière à imiter parfaitement la loi de déviation valable pour une lentille gravitationnelle.

On a ainsi établi la forme de lentilles capables d'imiter la déviation des rayons lumineux produite par divers types de défecteurs (Figure 5). Ce genre de lentilles, faisant penser à de quelconques soucoupes volantes, ont effectivement été construites par les auteurs de cet article, et utilisées aux fins de reproduire des images de lentilles gravitationnelles.



Voici, en **figure 6**, le montage du banc optique comprenant, à gauche, la source de lumière, au centre la lentille optique, suivie d'un premier écran percé d'un trou d'épingle (pinhole), représentant la surface du récepteur utilisé par l'observateur. Sur l'écran de droite, on aperçoit l'image recueillie, en l'occurrence 4 images de la même source ponctuelle.**



La figure 7 permet de comparer les images obtenues d'une part à l'aide de ce dispositif de simulation, et d'autre part par l'observation des mirages gravitationnels

La colonne de gauche (images a-g) montre les images observées sur le premier écran percé du trou d'épingle. Dans les deux premiers cas (a-b), la lentille optique est à symétrie axiale; dans les autres cas (c-g) elle est dissymétrique. La colonne du centre présente les images recueillies sur l'écran de droite, successivement en anneau elliptique ressemblant à un anneau d'Einstein (h), une image dédoublée et amplifiée (i), une quadruple image semblable au mirage gravitationnel connu sous le nom de «croix d'Einstein» (j), et ensuite d'autres exemples correspondant à diverses formes de mirages optiques.

Dans la colonne de droite, on trouve des mirages gravitationnels de formes comparables aux mirages optiques. Les images (p, r, s, t) ont été obtenues au moyen du Télescope Spatial Hubble (HST), les autres grâce à des télescopes terrestres. L'image (s) est particulièrement intéressante car on peut y repérer le défecteur responsable du dédoublement. Le mirage est présenté en figure 8. (* ESO et VLA/NRAO).

Ce tableau, d'un grand intérêt didactique, a été établi par Anna et Jean Surdej, avec l'aide de Sjur Refsdal. La ressemblance entre les images obtenues par simulation optique et celles réellement observées dans le ciel profond est assez extraordinaire. Bien sûr, les spécialistes ne se contentent pas d'une pareille ressemblance. Les formules mathématiques utilisées pour la confection de lentilles optiques permettent également de construire un modèle géométrique pour le défecteur réel, constitué d'une galaxie ou d'un amas de galaxies. Parfois le défecteur est lui-même apparent sur le cliché photographique, ce qui permet d'affiner le modèle (figure 8).

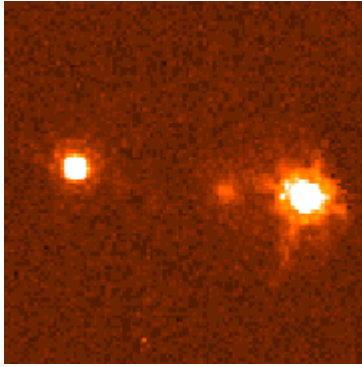


Figure 8

Ainsi, à partir d'images multiples, d'arcs ou d'anneaux, les chercheurs reconstituent les chemins suivis par les rayons lumineux émis par un quasar lointain. Plus de 50 images multiples de quasars sont aujourd'hui certifiées; on a notamment vérifié que ces images multiples proviennent bien de la même source, en comparant les différents spectres. Parfois de légères différences apparaissent, que l'on explique alors par le fait que les divers rayons ont traversé des régions différentes du défecteur, que ce soit une galaxie ou un amas.

Une fois acquise la certitude que plusieurs images correspondent au même quasar, les chercheurs obtiennent de précieux renseignements sur la forme et la masse du défecteur. Voici donc un outil puissant permettant de «peser» ce défecteur, notamment quand il s'agit d'un amas de galaxies, pouvant contenir une quantité importante de « masse cachée ».

Ce domaine de recherche ouvre ainsi de nouvelles voies pour la cosmologie: outre la mise en évidence de masses cachées, on peut citer la détermination de la fameuse « constante de Hubble » H_0 . Rappelons que la loi de Hubble, sous sa forme la plus simple, nous dit que la vitesse d'éloignement d'une galaxie est proportionnelle à cette constante, ainsi qu'à la distance de la galaxie par rapport à nous ($v=H_0D$). Les observateurs déterminent la vitesse grâce à la mesure précise du redshift, autrement dit le décalage spectral vers le rouge affectant les raies émises par la source qui s'éloigne. La distance D est (difficilement) estimée à partir d'indicateurs parmi lesquels on peut citer les céphéides et les supernovae.

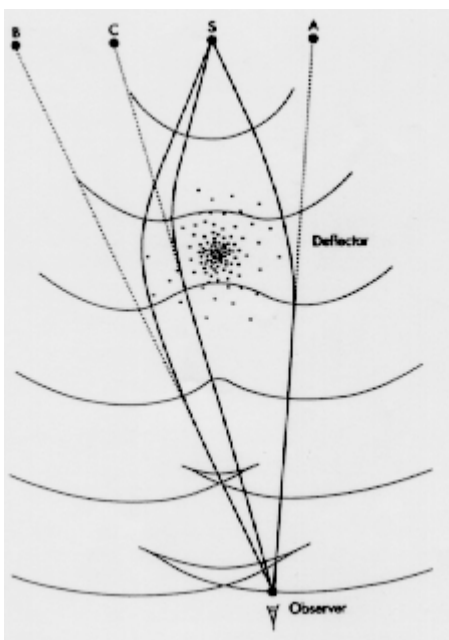


Figure 9

Il existe également des lois indiquant comment la distance varie avec la luminosité apparente d'une galaxie, ou encore son diamètre apparent. Toutes ces études

aboutissent évidemment à formuler la loi de Hubble sous une forme bien plus compliquée, qui dépend du modèle d'univers considéré. De toute façon, la loi obtenue fait intervenir la constante de Hubble, dont la valeur précise est très difficile à obtenir. Rappelons que l'inverse de la valeur de H_0 permet d'obtenir un ordre de grandeur pour l'âge probable de notre univers.

L'étude des mirages gravitationnels fournit un moyen tout à fait nouveau pour la détermination de H_0 . La méthode est basée sur la mesure d'un décalage temporel qui parfois se manifeste entre les diverses images d'une même source. Comme le montre la figure 9, dans le cas des trois images A, B, C observées à partir d'une source S, les rayons lumineux ont parcouru des distances notablement différentes avant d'arriver à l'observateur.

De surcroît, les mêmes rayons traversent des puits de potentiel gravifiques différents lorsqu'ils passent à proximité du défecteur, et se propagent ainsi, par rapport à l'observateur, avec des vitesses légèrement différentes, toutes d'ailleurs inférieures à 300000 km/s. C'est comme si l'environnement du défecteur pouvait être caractérisé par un indice de réfraction variable ... et achromatique.

Si par chance la source S présente des variations temporelles de lumière, celles-ci se manifesteront à des moments différents sur les enregistrements. Or le calcul des longueurs parcourues fait intervenir immanquablement la constante de Hubble. Celle-ci, en retour, pourra être mesurée à partir des décalages temporels obtenus. Signalons qu'un décalage temporel de plus d'un an a été observé!

Comme indiqué dans le deuxième article, une première détermination a fourni la valeur $H_0=63\pm 7$ km/sec/Mpc, soit une valeur inférieure à celle qui a été fréquemment citée durant les cinquante dernières années. Cette valeur relativement faible de H_0 , qui semble confirmée par les études récentes de certaines supernovae, aboutit à revoir à la hausse l'âge présumé de l'Univers, avec une valeur de plus de 13 milliards d'années. Ceci n'est pas pour déplaire aux astrophysiciens, pour qui il semblait désagréable d'observer des étoiles plus vieilles que l'Univers ...

En conclusion, l'étude des mirages gravitationnels, après avoir mis quelques dizaines d'années à vaincre le scepticisme de certains, constitue aujourd'hui un domaine de recherche en pleine expansion. Il est désormais impossible de décrire l'Univers des galaxies en ignorant que de nombreuses images de sources lointaines ont subi maintes transformations avant de nous parvenir.

On ne peut refuser les mirages, sous peine de vivre dans l'illusion.

Les mirages gravitationnels (IV)

Les lentilles gravitationnelles et l'expérience du verre de vin

Dans des articles parus dans les trois derniers numéros du Ciel, nous avons décrit les principes de base qui régissent la formation des mirages atmosphériques et des mirages gravitationnels. Nous avons ensuite montré comment ces phénomènes peuvent être simulés grâce à des lentilles optiques spécialement fabriquées à cet effet. Dans le présent article, nous allons montrer les analogies existant entre ces mirages et les images multiples de sources de lumière vues au travers d'autres types de lentilles.



Figure 1

Ainsi, la formation des images multiples d'un quasar distant par les effets de lentille gravitationnelle induits par un défecteur d'avant-plan (galaxie, amas de galaxies, etc.) peuvent être très simplement et fidèlement reproduites au moyen de l'expérience du verre de vin rouge... Le choix de ce liquide est purement scientifique : il s'agit de minimiser l'aberration chromatique. Rappelons en effet que les déviations des rayons lumineux provoquées par les lentilles gravitationnelles sont les mêmes pour toutes les longueurs d'onde.

Un premier aperçu de la distorsion produite par le verre de vin est présenté à la Fig. 1 : le verre est placé sur une feuille de papier millimétré, et l'on observe aisément la déformation du champ d'arrière-plan. L'expérience proprement dite est réalisée ici avec comme source de lumière une bougie, censée imiter le quasar lointain (l'ampoule d'une lampe de poche peut tout aussi bien convenir).

Dans le montage présenté à la Fig. 2, la source de lumière est placée à une distance de plusieurs mètres comptés à partir d'une table de cuisine ou de salle à manger, sur laquelle on a déposé un verre de vin rouge. A l'instar d'une lentille gravitationnelle, le verre de vin redistribue derrière lui le champ de lumière émis par la source. De fortes concentrations de lumière existent sur la table, juste derrière le verre de vin. Ces concentrations de lumière correspondent à des

caustiques de lumière, dues à la superposition de paires de rayons qui s'intersectent quasiment parallèlement. La caustique à 2 dimensions visible sur la table est bien sûr le résultat de l'intersection d'une caustique à 3 dimensions avec le plan de la table. Dans le cas présent, la caustique a une forme à peu près triangulaire. Les trois côtés sont appelés branches de la caustique, les trois sommets sont appelés « croisements ».

Un agrandissement de cette caustique est présenté à la Fig. 3. Les branches de la caustique résultent de l'enveloppe de paires de rayons lumineux tangents deux à deux qui ont été émis par la bougie. Il en résulte que si un observateur place son oeil sur une branche de caustique, il apercevra une paire d'images de la source distante, images qui fusionnent pratiquement. La fusion de trois images sera vue lorsque l'oeil de l'observateur sera placé sur un croisement de la caustique. La fusion de telles images fait bien sûr penser aux arcs lumineux qui ont été décrits dans les articles précédents.

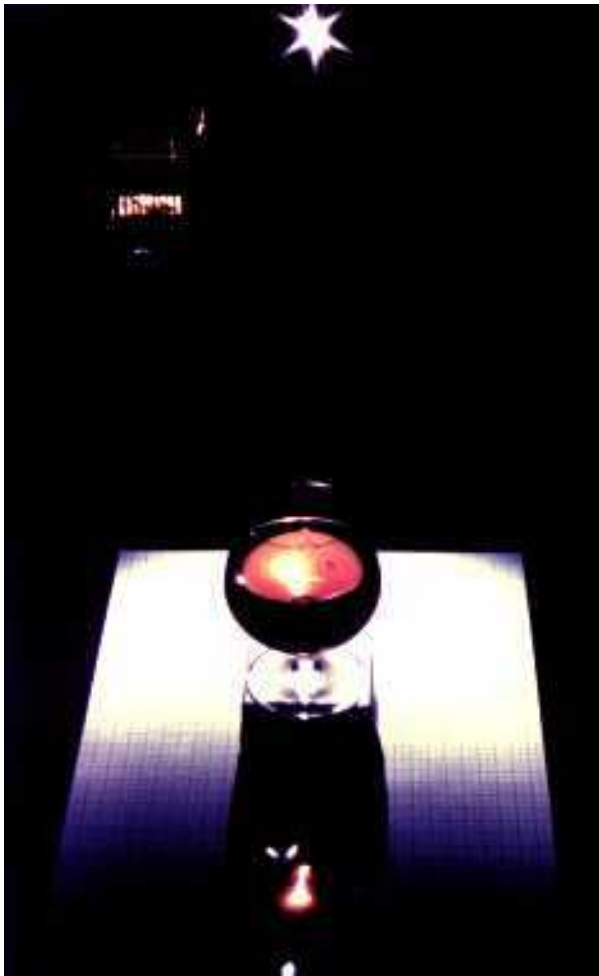


Figure 2

Afin de pouvoir positionner votre oeil en divers endroits de la caustique, nous vous recommandons de placer le verre de vin très près du bord de la table directement opposé par rapport à la source de lumière. Vous pourrez alors aussi constater que le nombre total d'images, qui est toujours impair, diminue de 2 lorsque votre oeil passe au travers d'une branche ou d'un croisement, de l'intérieur vers l'extérieur de la caustique. Ceci correspond à un théorème dû à Burke, et démontré dans le cas des lentilles gravitationnelles transparentes.

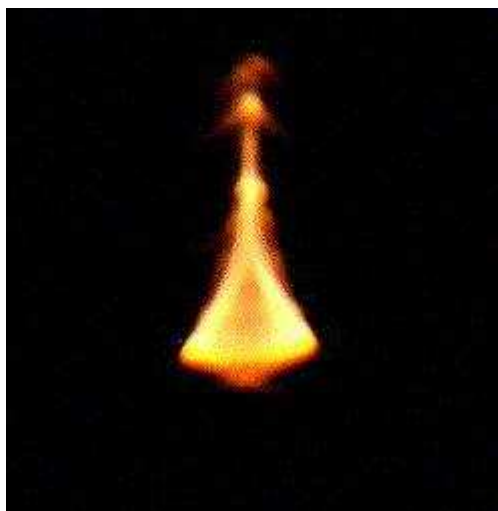


Figure 3

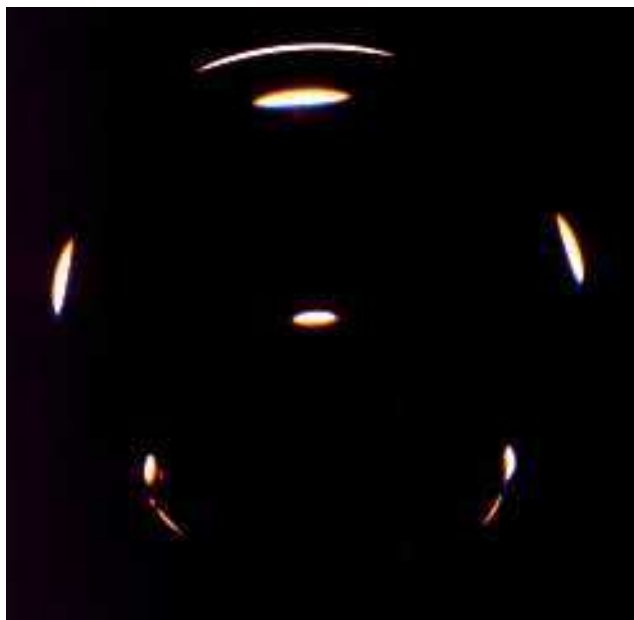


Figure 4

La Fig. 4 illustre une photo obtenue avec une caméra dont l'objectif a été placé au centre de la caustique : un total de 9 images de la source de lumière y sont visibles.

Comme exercice, nous vous suggérons de dessiner toutes les différentes configurations d'images d'une source de lumière distante vue au travers d'un verre de vin lorsque vous déplacez votre oeil en différents points de la caustique. Comparez ces images à celles observées pour des quasars distants dont certaines photographies ont été publiées dans nos articles précédents. Pour rappel, une galerie plus complète des mirages gravitationnels connus est disponible via la page web : http://vela.astro.ulg.ac.be/grav_lens/

Autres exemples de caustiques et d'images multiples

Il est important de dire ici que la formation de caustiques est un phénomène tout à fait répandu dans la nature. Ceci se produit chaque fois qu'un objet d'avant-plan dévie la propagation de rayons de lumière d'une source distante. Par exemple, à chaque paire constituée par un quasar et une galaxie, ou par une étoile et une autre, ou par une planète et un quasar, ou par un amas de galaxies et une étoile, etc., correspond une caustique de lumière à 3 dimensions plongée dans l'Univers, et dirigée à partir de la lentille dans la direction opposée à la source. Chaque fois qu'un observateur se trouve à proximité d'une telle caustique, il voit des images multiples de la source de lumière d'arrière-plan. A cause des mouvements relatifs entre l'observateur, la lentille d'avant-plan et la source d'arrière-plan, ce phénomène ne dure pas éternellement. On peut montrer que la durée de vie typique d'un mirage cosmique constitué d'un quasar source et d'une galaxie lentille est de l'ordre de 20 millions d'années. Si on remplace la galaxie lentille par une simple étoile, beaucoup moins massive, on trouve que cette durée de vie est ramenée à seulement 20 ans. Si l'étoile lentille se trouve non pas à des distances cosmologiques mais est située dans le halo de notre Galaxie, la durée de vie du mirage cosmique peut n'être que de quelques semaines. Des centaines de tels mirages, appelés événements micro-lentille ont déjà été observés.

A propos de mirages observés par les baleines et les requins

A cause du vent, l'interface entre l'air et l'eau dans les mers, dans les océans..., est ondulé en permanence et par conséquent les rayons lumineux qui proviennent soit du Soleil, de la Lune ou des étoiles sont déviés de façon aléatoire dès qu'ils pénètrent dans l'eau.

Il en résulte la formation de caustiques aquatiques et la Fig. 5 illustre de telles caustiques projetées sur le fond d'une piscine. La Fig. 6 illustre aussi très bien ce à quoi ressemblent des caustiques projetées sur le corps d'une baleine, telles qu'imaginées par le peintre américain Miller.

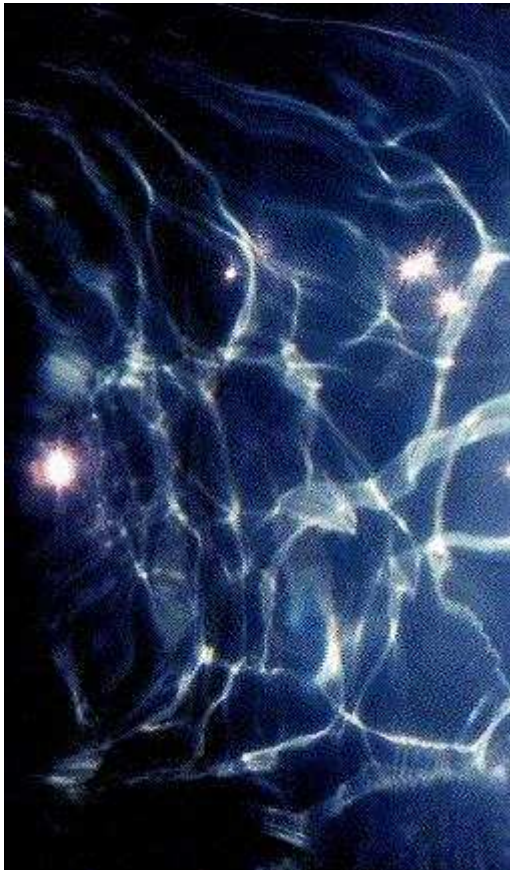


Figure 5



Figure 6

En conséquence, il n'y a aucun doute que chaque fois qu'un des yeux de la baleine passe au travers d'une branche ou d'un croisement de caustique, celle-ci apercevra des images multiples du Soleil, de la Lune ou même des étoiles. Bien entendu, la configuration de ces images changera au cours du temps, suivant les humeurs du vent et les mouvements du cétacé.

De telles images multiples, telles que les voient les requins du grand aquarium Sea World (Orlando, Floride) ont été photographiées par deux des auteurs au mois de Février 1994 (cf. Figs. 7 et 8).

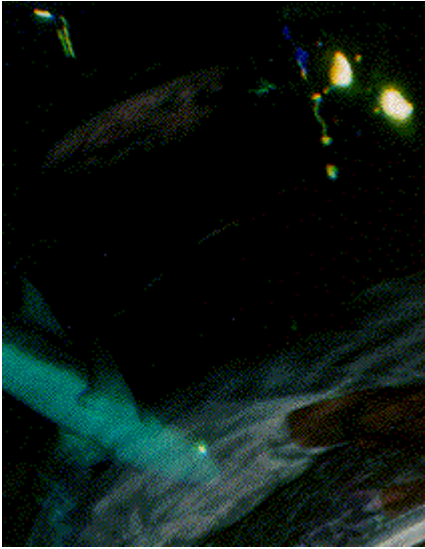


Figure 7



Figure 8



Figure 9, Photographie obtenue par J. Schramm

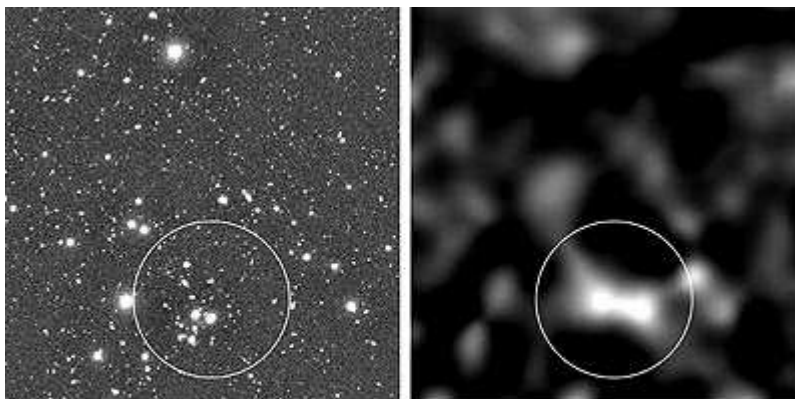


Figure 10, Photographie obtenue par J. Schramm

Voici d'autres exemples de caustiques (Fig. 9) et d'images multiples (Fig. 10) pour lesquelles les sources sont des pièces de monnaie placées au fond d'une piscine (photographies obtenues par J. Schramm). A partir de l'analyse des faibles distorsions d'images observées pour les pièces de monnaie, il est possible pour un astrophysicien spécialisé dans l'étude des mirages de restituer la forme exacte de l'interface entre l'air et l'eau présent au moment de la prise de la photographie.

Les faibles distorsions d'images vues pour les pièces de monnaie rappellent celles détectées pour les images de faibles galaxies lointaines dans l'Univers. De telles distorsions photographiées avec un des quatre très grands télescopes de 8,2m de diamètre (Very Large Telescope) de l'ESO ont été présentées tout récemment.

En étudiant ces distorsions d'images de 76.000 galaxies faibles d'arrière-plan très distantes, les astrophysiciens ont été à même de dresser une cartographie précise de la distribution de la matière, pour la plupart invisible, responsable de la déviation des rayons lumineux en provenance des galaxies lointaines.



VLT Image (I-band) (VLT ANTU + FORS1)

Dark Matter Distribution (Reconstruction)

Cosmic Shear in Sky Field with Galaxy Cluster

Figure 11 : Cosmic Shear in Sky Field with Galaxy Cluster

Cette technique s'annonce comme un moyen futur très puissant de tracer la distribution de la matière dans l'Univers, visible et invisible. A partir de telles analyses, une équipe internationale d'astrophysiciens a déjà pu conclure que seule la matière visible et invisible ne pouvait à elle seule stopper l'expansion de l'Univers. La partie gauche de la Fig. 11 est un cliché CCD profond du ciel à partir de laquelle de très légères distorsions d'images de faibles galaxies ont été mises en évidence; la Fig. 11 de droite représente une cartographie de la distribution de la matière dans cette direction du ciel déterminée à partir de l'analyse des observations.

Les régions les plus brillantes sur la photo de droite correspondent aux plus grandes concentrations de matière détectée, visible et invisible. La plus forte concentration de masse correspond en fait à un amas de galaxies visibles sur la photo de gauche.

Les mirages de la Foire

Finalement, il est aussi possible d'observer sans trop de peine chez nous, en automne, des mirages d'êtres humains. Il suffit de se rendre à la foire de Liège, plus exactement dans le palais des miroirs déformants. Ceux-ci sont produits par de grands miroirs déformés, ondulés qui dévient les rayons lumineux en provenance des visiteurs. Voici en Figs. 12 et 13, deux images de Virginie et Isabelle Surdej, prises au mois d'octobre 1989.



Figure 12



Figure 13

Texte traduit et adapté par André Lausberg, à partir des références suivantes:

Gravitational lenses, par Sjur Refsdal et Jean Surdej, paru dans les Reports of Progress in Physics, 56 (1994) pp.117-186.

Gravitational Lensing par Jean Surdej et Jean-François Claeskens, écrit pour le livre intitulé The Century of Space Science, sous presse.

Rappelons également le site internet où l'on peut trouver des compléments d'informations et de nombreuses images:

http://vela.astro.ulg.ac.be/grav_lens/

Réjou**sciences** est une cellule de coordination mise en place au sein de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège. Elle a pour mission d'épauler les initiatives existantes de diffusion des sciences et de favoriser le développement d'activités nouvelles.

Réjou**sciences** coordonne divers événements tels que le Printemps des Sciences et s'attache à entretenir un contact étroit avec le grand public et les écoles.

A cet égard, trois canaux d'information ont été mis en place :

- une brochure annuelle ;
- une newsletter électronique mensuelle à laquelle il vous est possible de vous abonner gratuitement ;
- un site web (www.ulg.ac.be/sciences).

Ils présentent les acteurs de la diffusion des sciences et recensent leurs activités, à l'Université de Liège et parmi ses principaux partenaires.

L'équipe de Réjou**sciences** se tient à votre disposition !



Réjou**sciences**

Faculté des Sciences de l'Université de Liège
Institut de Zoologie • quai Van Beneden, 22 • Bât. I1 • 4020 Liège
Tél. : +32 (0)4/366 96 96 • Fax : +32 (0)4/366 29 33
sciences@ulg.ac.be • www.ulg.ac.be/sciences

Réjou**sciences** est membre du réseau Scité • www.sciences.be

www.ulg.ac.be/sciences/lentille

Ce cahier pédagogique est présenté avec la lentille gravitationnelle mise au point à des fins didactiques par le Professeur Jean Surdej (Astrophysique extragalactique et observations spatiales – AEOS) grâce au soutien financier de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège.

Année d'édition : 2007

Éditeur responsable : Jean-Marie Bouquegneau, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège