

Les lentilles gravitationnelles

Exemple avec un quasar dédoublé



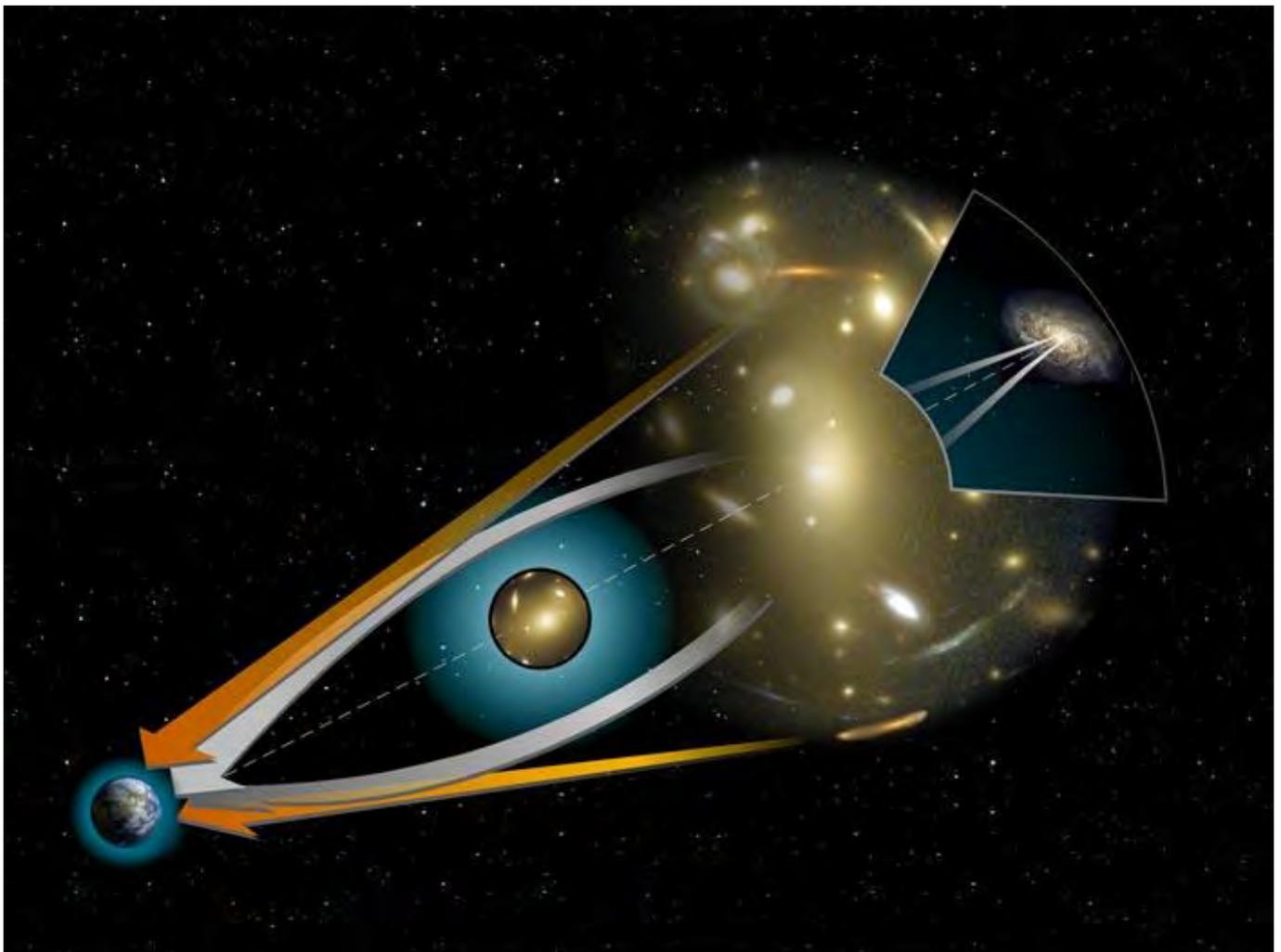
Les lentilles gravitationnelles

(Suivi d'un exemple avec un quasar dédoublé par une lentille gravitationnelle)

En astrophysique, une **lentille gravitationnelle**, ou **mirage gravitationnel**, est produit par la présence d'un corps céleste très massif (tel, par exemple, un amas de galaxies) se situant entre un observateur et une source « lumineuse » lointaine. La lentille gravitationnelle, imprimant un fort champ gravitationnel autour d'elle, aura comme effet de faire dévier les rayons lumineux qui passeront près d'elle, déformant ainsi les images que recevra un observateur placé sur la ligne de visée. En cas d'alignement parfait de la source observée et du corps céleste jouant le rôle de lentille gravitationnelle par rapport à l'observateur, le mirage peut prendre la forme d'un « anneau d'Einstein ».

Prédits par la relativité générale d'Albert Einstein, plusieurs mirages gravitationnels ont depuis été observés par, entre autres, le télescope spatial Hubble. Ils sont particulièrement présents lorsque l'on fait des clichés de champs profonds de l'univers observable. Ils font l'objet de plusieurs études et leurs effets servent, notamment, à la détection de la matière noire présente dans l'Univers.

Il existe trois sous-catégories de lentilles gravitationnelles : les lentilles gravitationnelles fortes, les lentilles gravitationnelles faibles et les microlentilles gravitationnelles.



Principe de la déviation des rayons lumineux. Il est important de remarquer que la déviation n'est pas du tout similaire à celle d'une lentille optique.

Principe :

Un astre massif, tel qu'une étoile, un trou noir ou une galaxie, courbe l'espace-temps, selon les lois de la relativité générale. La lumière, suivant toujours le chemin le plus court, suit les géodésiques dans l'espace-temps qui ne sont plus des lignes droites, et est donc déviée par le champ gravitationnel.

Contrairement aux lentilles optiques, la déflexion des rayons lumineux est maximale au plus près du centre de la lentille gravitationnelle et minimale au plus loin de ce centre. (Si l'observateur est très désaxé, l'effet sera donc négligeable et on verra quasi normalement la source d'arrière-plan.) En conséquence, une lentille gravitationnelle n'a pas un unique point focal, mais à la place a une "ligne focale".

Ainsi, par exemple, si une galaxie proche et un quasar lointain se retrouvent sur une même ligne de visée, c'est-à-dire exactement dans la même direction du ciel par rapport à l'observateur, la lumière provenant du quasar sera fortement déviée lors de son passage près de la galaxie. Les rayons lumineux qui passent légèrement au-dessus de la galaxie sont déviés vers le bas et donnent lieu à une image du quasar décalée vers le haut. Par contre, les rayons lumineux qui passent sous la galaxie sont déviés vers le haut et donnent naissance à une image du quasar décalée vers le bas. De cette façon, la galaxie proche, en perturbant la propagation de la lumière du quasar, donne naissance à plusieurs images de celui-ci.

Le nombre total d'images est déterminé par la forme de la galaxie et la précision de l'alignement. Parfois, lorsque l'alignement entre les deux objets est parfait, l'image de l'objet lointain peut être modifiée au point de prendre la forme d'un anneau lumineux entourant l'image de l'objet proche.

En observant certaines galaxies ou certains quasars, on assiste quelquefois à de curieux effets optiques : leur image est dédoublée, triplée ou même quintuplée à quelques secondes d'arc de distance ou prennent la forme d'arcs incurvés autour d'un axe central. Ces images multiples sont en tous points en parfaites corrélations. En plus de multiplier les images du quasar, la galaxie va également concentrer la lumière de celui-ci et donc produire des images bien plus brillantes. Cet effet est le bienvenu lorsqu'on observe des corps très peu lumineux.

Observation :

En 1937, à l'aide des lois de la relativité générale, Fritz Zwicky prédit que les galaxies peuvent provoquer des effets gravitationnels sur la lumière des sources qu'elles occultent. Les effets de lentille gravitationnelle sont discutés par d'autres auteurs à la fin des années 1960.

Le premier exemple de ce phénomène est observé le 29 mars 1979 par l'astronome britannique Dennis Walsh et ses collaborateurs du Kitt Peak. Les astronomes observent ainsi deux images d'un quasar baptisé Q0957+561A-B. Les deux objets, séparés de 6 secondes d'arc, sont de magnitude 17,5 et présentent rigoureusement le même spectre, avec un décalage vers le rouge de 1,407. Walsh suppose qu'il s'agit de l'image dédoublée d'un quasar unique. Des observations ultérieures le confirment et montrent que la lentille gravitationnelle est dans ce cas créée par une galaxie elliptique géante quatre fois plus proche de la Terre que le quasar.

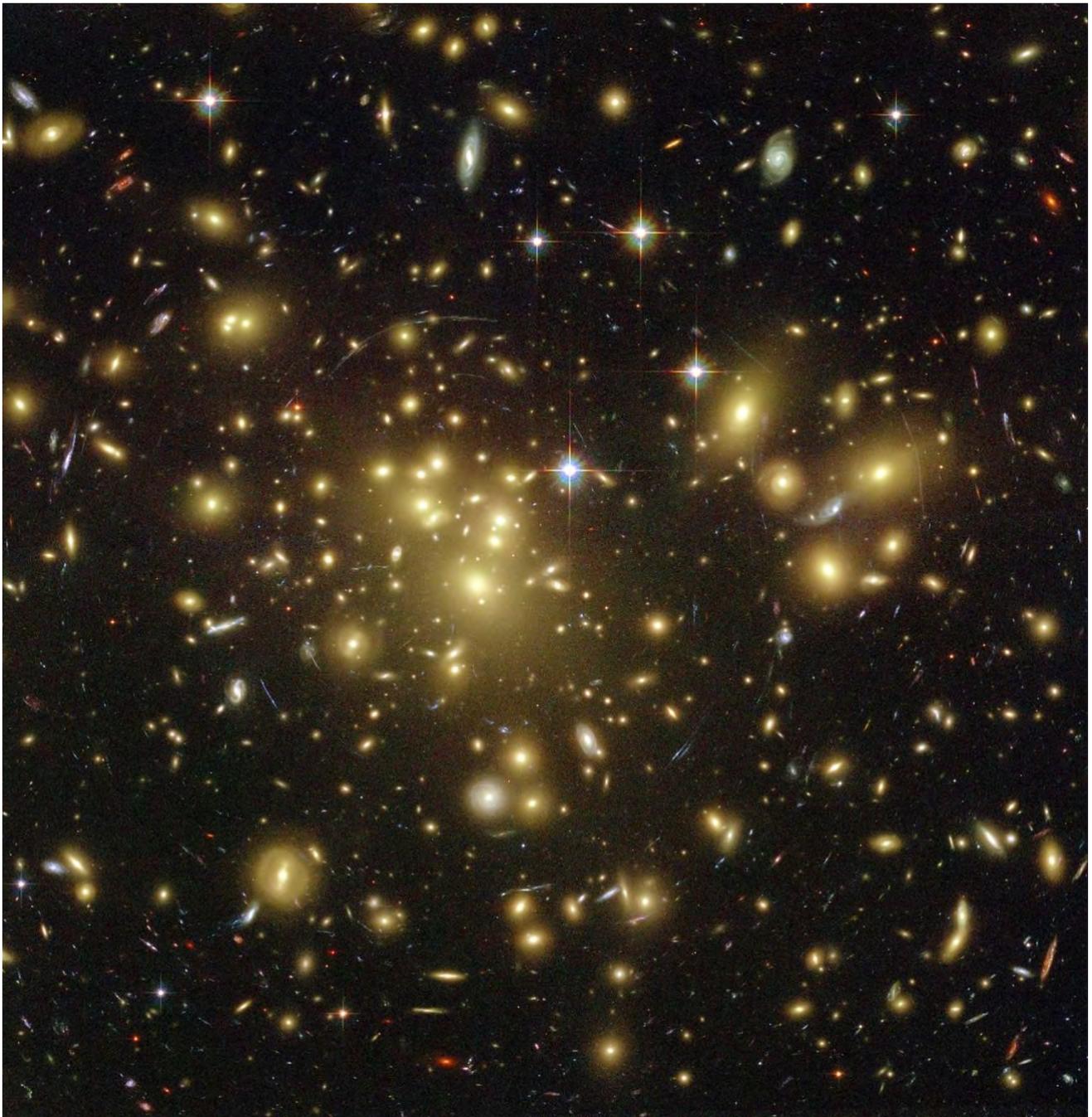
Les effets de lentilles gravitationnelles fortes créées par des amas de galaxies sont détectés pour la première fois à la fin des années 1970 par Roger Lynds de la National Optical Astronomy Observatory et Vahe Petrosian de l'université Stanford lorsque ces derniers découvrent un arc lumineux géant dans une étude d'amas de galaxies. Lyngs et Petrosian publient leur découverte plusieurs années plus tard, en 1986, sans savoir l'origine de l'arc.

En 1984, J. Anthony Tyson des laboratoires Bell et ses collaborateurs sont les premiers à postuler le concept d'effet de lentille gravitationnelle galaxie-galaxie, bien que leurs résultats ne soient pas concluants.

En 1987, une équipe menée par Geneviève Soucail de l'observatoire de Toulouse présente des données d'une structure semblable à un anneau bleu dans Abell 370 et lancent l'idée d'un effet de lentille gravitationnelle.

En 1988, des radioastronomes du Very Large Array découvrent une lentille gravitationnelle en forme d'anneau, MG 1131+0456, conforme à la théorie. L'objet est baptisé « l'anneau d'Einstein ».

La première analyse de lentilles gravitationnelles créées par des amas est conduite en 1990 par une équipe menée par Tyson. Cette dernière détecte un alignement cohérent de l'aplatissement de galaxies bleu pâle en arrière de Abell 1689 et CL 1409+52.

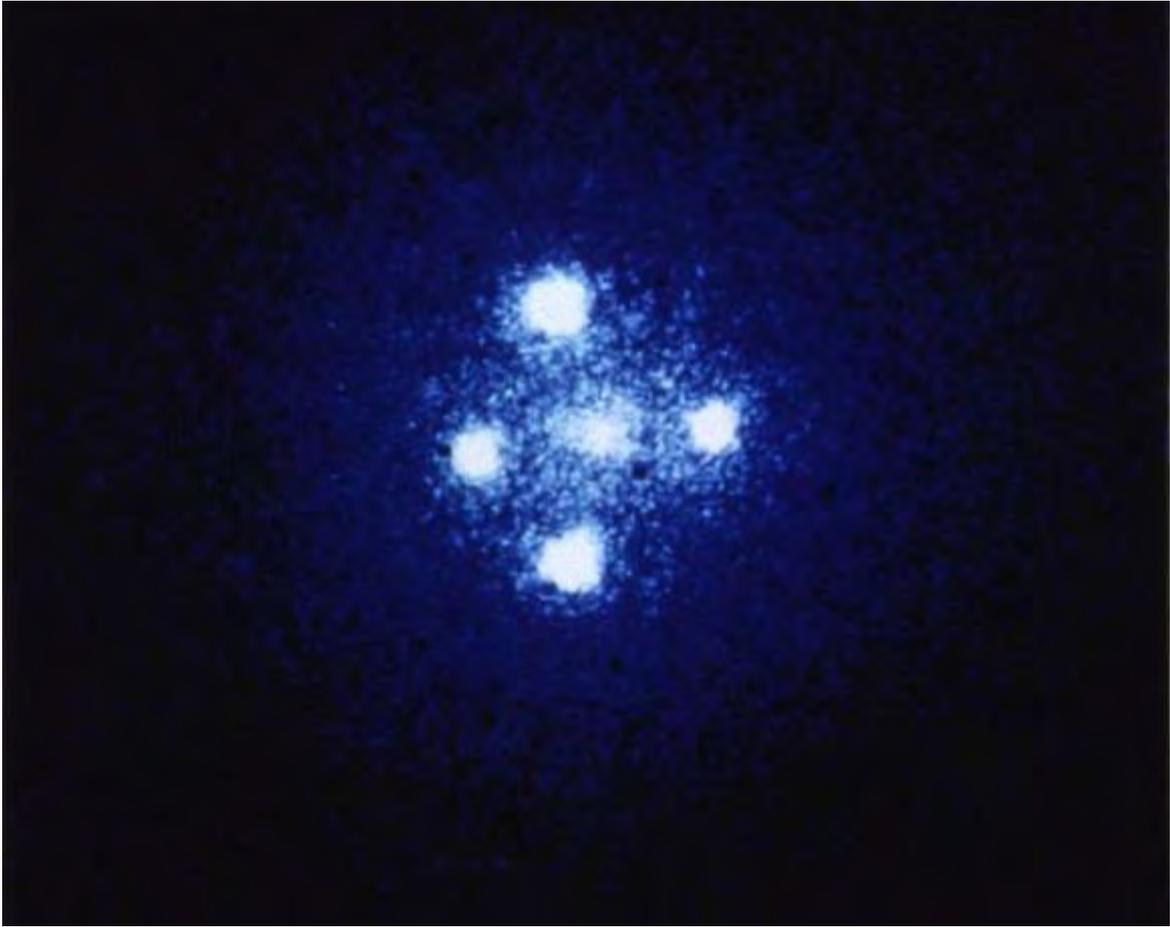


Certains des arcs lumineux les plus faibles de cette image sont en fait des galaxies situées à un peu plus de 13 milliards d'années-lumière, déformées par l'effet de lentille gravitationnelle.

En 1995, le télescope spatial Hubble révèle un exemple très impressionnant de lentille gravitationnelle créée par l'amas de galaxies Abell 2218, qui produit des images multiples de toute une population de galaxies lointaines et donne naissance à plus de 120 arcs lumineux.

En 1996, Tereasa G. Brainerd publie des observations convaincantes d'effet de lentille gravitationnelle galaxie-galaxie. En 2000, une vaste étude utilisant des observations du Sloan Digital Sky Survey présente des résultats significatifs d'observation de lentilles galaxie-galaxie.

La même année, quatre groupes indépendants ont publié la première détection de cisaillement cosmique. Depuis ces découvertes, la construction de télescopes plus grands, ayant de meilleures résolutions et l'avènement d'études de galaxies à grand champ ont grandement augmenté le nombre de sources d'arrière-plan et de galaxies lenticulaires en avant-plan, facilitant l'observation des signaux lenticulaires et permettant un échantillonnage statistique beaucoup plus solide des galaxies concernées. En 2017, des données prises par le télescope spatial Hubble ont permis de mesurer la masse d'une naine blanche par effet de lentille gravitationnelle, avec une déflexion de $31,53 \pm 1,20$ mas (*mas = micro-arc-seconde*).



« Croix d'Einstein » (QSO 2237+0305). L'observation de ce quasar situé à 8 milliards d'années-lumière se fait par déflexion à travers une galaxie-lentille située 20 fois moins loin, à 400 millions d'années-lumière. Le quasar en 4 exemplaires ! (Photographie ESA, prise par le télescope américain Hubble).



Anneau d'Einstein créé par la galaxie intermédiaire LRG 3-75. L'alignement entre les deux galaxies est ici si parfait que l'image de la galaxie d'arrière-plan ébauche la forme d'un cercle (on dit parfois « image en fer-à-cheval »).

Constante de Hubble :

L'étude des mirages gravitationnels permet aux astrophysiciens relativistes d'évaluer la distribution de matière dans l'univers et de calculer sa masse. Si de telles observations se répètent, il sera possible de déterminer la courbure de l'univers et de fixer avec précision la constante de Hubble.



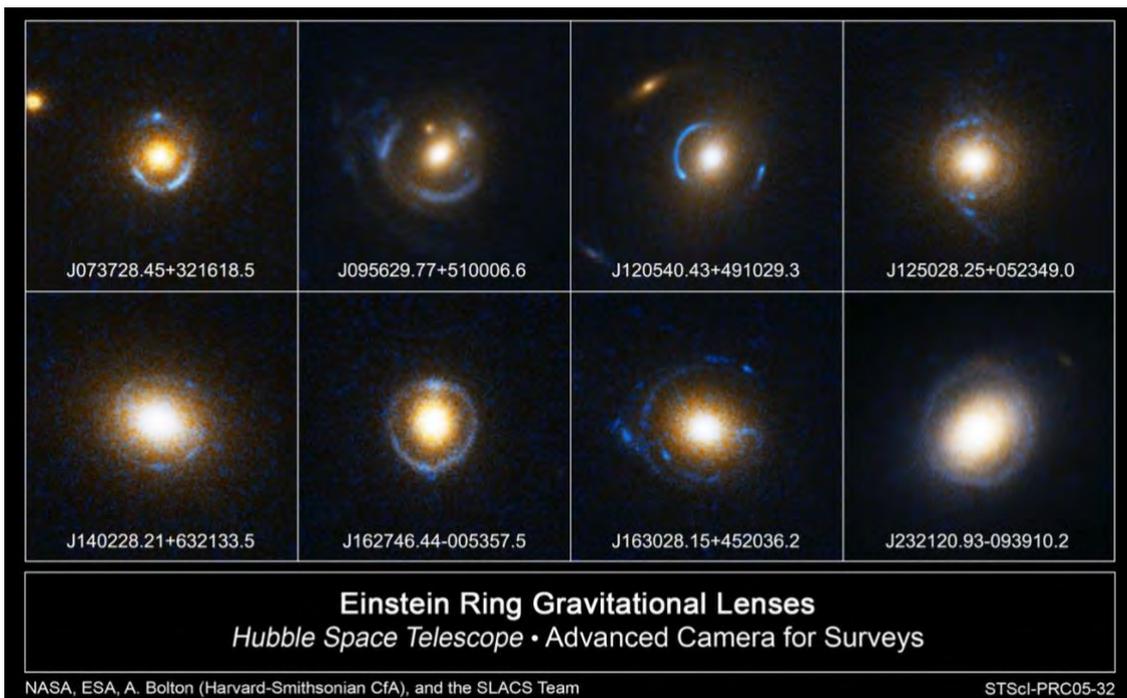
Simulation de mirage gravitationnel.

Voici ce que nous verrions si un trou noir se trouvait entre nous et une galaxie.

Les rayons lumineux qui contournent la lentille par différents côtés suivent des trajectoires qui ne sont pas identiques et n'ont généralement pas la même longueur. Ainsi, le temps mis par la lumière pour nous atteindre diffère selon l'image que nous observons. Pour cette raison, si le quasar subit une brusque variation de luminosité, ses différentes images ne répercutent pas le changement de façon simultanée, mais à des moments bien distincts dans le temps.

C'est la mesure de ce type de décalage qui peut nous conduire à la constante de Hubble. L'analyse du phénomène montre en effet que le délai entre le changement de luminosité des différentes images est inversement proportionnel à H_0 et dépend très peu des autres paramètres cosmologiques. S'il était possible de mesurer un tel délai, on pourrait remonter à H_0 et obtenir une évaluation indépendante de cette constante.

En 1989, Christian Vanderriest de l'Observatoire de Meudon et ses collègues fixent une limite supérieure, $H_0 < 175 \text{ km/s/Mpc}$ et plus proche de $H_0 \approx 105 \text{ km/s/Mpc}$, voisine de la valeur obtenue par E. Falco en 1987.



Différents « anneaux d'Einstein » partiels pris par le télescope spatial Hubble.

Qu'est-ce qu'un « Quasar » ?

Un **quasar** (en français : **source de rayonnement astronomique quasi-stellaire**, *QUAsi Stellar Astronomical Radiosource*), est une galaxie très énergétique avec un noyau galactique actif.

Les quasars sont les entités les plus lumineuses de l'univers. Bien qu'il y ait d'abord eu une certaine controverse sur la nature de ces objets jusqu'au début des années 1980, il existe maintenant un consensus scientifique selon lequel un quasar est la région compacte entourant un trou noir supermassif au centre d'une galaxie massive. Leur taille est de 10 à 10.000 fois le rayon de Schwarzschild* du trou noir. Leur source d'énergie provient du disque d'accrétion entourant le trou noir.

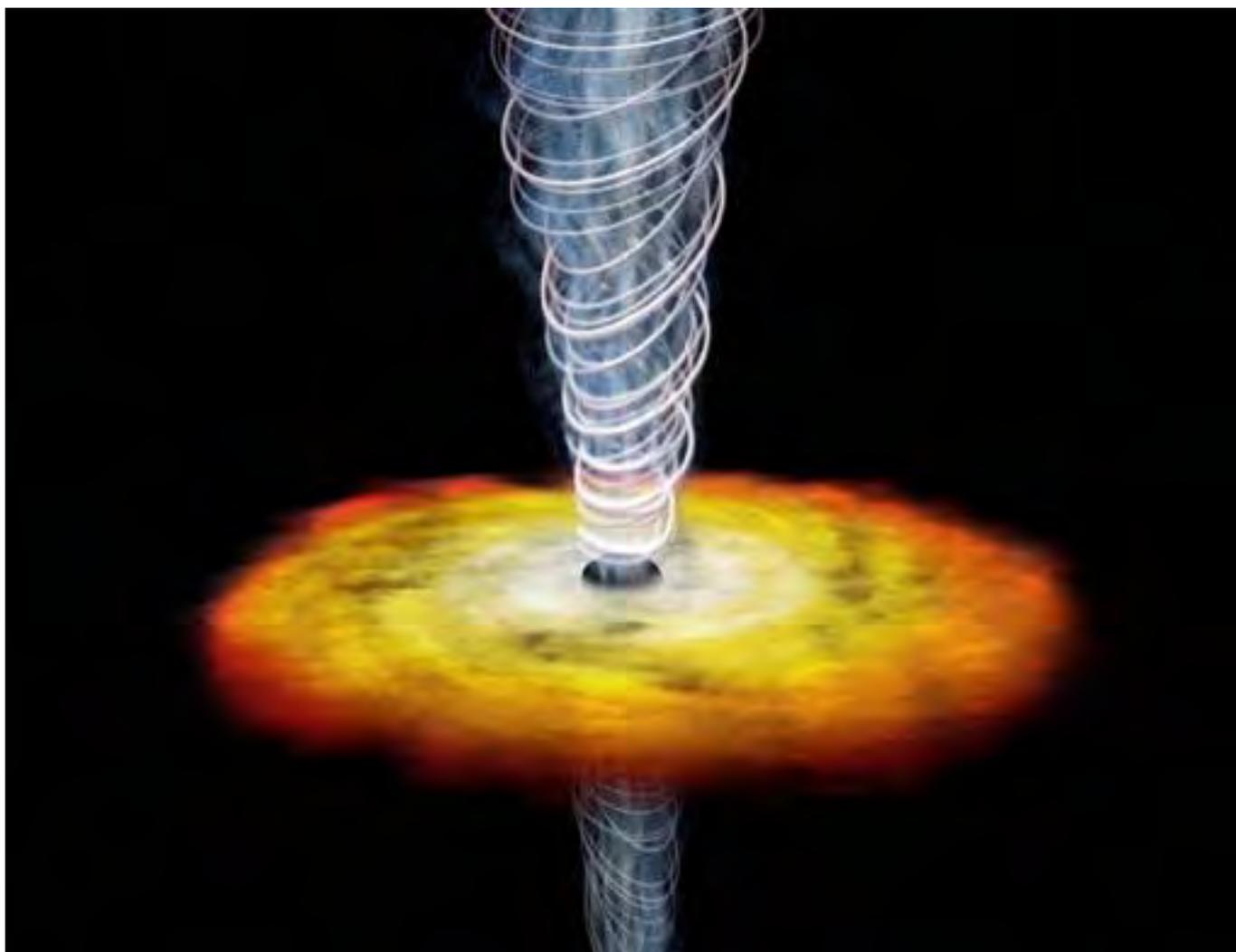


Avec les télescopes optiques, la plupart des quasars ressemblent à de petits points lumineux, bien que certains soient vus comme étant les centres de galaxies actives (couramment connus sous l'abréviation AGN, pour Active Galaxy Nucleus [noyau galactique actif]). La majorité des quasars sont beaucoup trop éloignés pour être vus avec de petits télescopes, mais 3C 273, avec une magnitude apparente (ou relative) de 12,9 est une exception. À 2,44 milliards d'années-lumière, c'est un des objets lointains observables avec un équipement d'amateur. Certains quasars montrent de rapides changements de luminosité, ce qui implique qu'ils sont assez petits (un objet ne peut pas changer plus vite que le temps qu'il faut à la lumière pour voyager d'un bout à l'autre). Actuellement, le quasar ULAS J1120+0641 est le plus lointain jamais observé, et se situe à 12,9 milliards d'années-lumière de la Terre. On pense que les quasars gagnent en puissance par l'accrétion de matière autour des trous noirs supermassifs qui se trouvent dans le noyau de ces galaxies, faisant des « versions lumineuses » de ces objets connus comme étant des galaxies actives. Aucun autre mécanisme ne paraît capable d'expliquer l'immense énergie libérée et leur rapide variabilité.

Structure d'un quasar :

Un quasar est composé de trois grandes parties principales :

- Le trou noir supermassif comportant la quasi-totalité de la masse du quasar (de quelques millions à quelques dizaines de milliards de fois la masse du Soleil). Il est également le centre du quasar.
- Le disque d'accrétion est le disque formé par la matière qui tombe dans le trou noir. La force de friction engendrée par le frottement des gaz dans le disque génère une forte chaleur.
- Les jets de gaz qui sont expulsés du disque d'accrétion par les lignes de champs magnétique du trou noir atteignent une vitesse proche de celle de la lumière.



Vue d'artiste du quasar GB1508, entre le blazar (en blanc) et le disque (en jaune)

NB : * En physique et en astronomie, le **rayon de Schwarzschild** est le rayon de l'horizon d'un trou noir de Schwarzschild, lequel est un trou noir dont la charge électrique et le moment cinétique sont nuls. Cela signifie qu'en dessous de ce rayon tous les photons (circulant à la vitesse de la lumière), ont (en oubliant qu'on est dans un cadre relativiste) des trajectoires elliptiques et ne peuvent s'échapper. Le **demi-rayon de Schwarzschild** ou **rayon gravitationnel** est la moitié d'un rayon de Schwarzschild (pour lequel ces trajectoires sont circulaires). Par extension, c'est une longueur intervenant dans la description relativiste du champ gravitationnel créé par une distribution de masse à symétrie sphérique. Il peut être défini, en première approximation, comme le rayon d'une sphère à partir de laquelle la masse de l'objet est tellement compacte que la vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière dans le vide, de sorte que la lumière elle-même ne peut s'en échapper. Il entre dans la définition du trou noir, modélisé par Karl Schwarzschild. En effet, si le rayon de la distribution de masse de l'objet considéré est inférieur au rayon de Schwarzschild, l'objet considéré est un trou noir dont l'horizon est la sphère de rayon égal au rayon de Schwarzschild.

Nous allons parler d'un exemple (parmi d'autres) qui démontre un effet de lentille gravitationnelle sur un quasar. Ce quasar, vu en double exemplaire par un effet de lentille gravitationnelle s'appelle « QSO 0957+561 ».

Traduction d'un article américain : Le quasar double ou Quasars Jumeaux (**Twin Quasar**) (aussi appelé **Twin QSO**, **Double Quasar**, **Q0957+561** ou **QSO 0957+561 A/B**), a été découvert en 1979 et a été le premier objet identifié comme étant le fruit d'un effet de lentille gravitationnelle. C'est un quasar qui apparaît comme deux images, lentille gravitationnelle a été identifiée, la galaxie YGKOW G1 qui est située exactement entre la Terre et le quasar.

QSO 0957+561 A et **QSO 0957+561 B** sont les deux composants d'une double image du même quasar, ce qui veut dire qu'une concentration de masse entre la Terre et le quasar courbe la lumière de telle sorte que deux images du même quasar apparaissent dans le ciel. C'est connu comme étant un effet de lentille gravitationnelle qui est la conséquence de la notion d'espace-temps modifié selon la théorie d'Einstein. Le quasar se trouve (selon son décalage vers le rouge) à 8,7 milliards d'années-lumière, tandis que la galaxie faisant office de lentille n'est qu'à 3,7 milliards d'années-lumière. Cette galaxie a une dimension apparente de 0.42×0.22 arc-minutes se trouve presque totalement alignée avec l'image B image, juste décalée d'un arc-seconde. Le quasar se trouve à 10 arc-minutes au nord de NGC 3079, dans la constellation de la Grande Ourse.

Les deux images du quasar sont séparée de 6 arc-secondes. Ces images ont une magnitude de 17, avec 16,7 pour le composant A et 16.5 pour le composant B. Il y a une différence de 417 ± 3 jours pour que la lumière nous parvienne de A et B. Un peu plus d'une année de différence pour un voyage de 8,7 milliards d'années.

La galaxie lentille, YGKOW G1 (parfois appelée *G1* ou *Q0957+561 G1*), est une galaxie elliptique géante (de type cD) qui fait partie d'un amas de galaxies qui contribue aussi à l'effet de lentille.

Les quasars QSO 0957+561A/B ont été découverts début 1979 par une équipe anglo-américaine autour de Dennis Walsh, Robert Carswell et Ray Weyman, avec l'aide du télescope de 2,1 mètres à l'observatoire national du Kitt Peak, en Arizona. Ce groupe a constaté que les deux quasars étaient inhabituellement proches l'un de l'autre, et que leurs décalages vers le rouge en lumière visible étaient étrangement similaires. Ils publièrent leur suggestion qu'il y avait peut-être deux images du même objet, causées par un effet lentille gravitationnelle.

Ce quasar double a été l'un des premiers effets observables de lentille gravitationnelle, qui avait été décrit en 1936 par Albert Einstein comme une conséquence de sa théorie de la Relativité Générale. Malgré cette prédiction il avait ajouté qu'il n'y avait aucun espoir d'observer directement ce phénomène (en quoi il se trompait...). Des critiques avaient toutefois identifié une différence d'apparence entre les deux quasars dans des images prises en ondes radio. En 1979, une équipe dirigée par David Roberts au VLA (Very Large Array) près de Socorro, au Nouveau Mexique (USA) a découvert un jet relativiste qui émergeait du quasar A avec aucun équivalent correspondant sur le quasar B. De plus, la distance entre les deux images, 6 arc-secondes, était trop importante pour avoir été créée par l'effet gravitationnel de la galaxie G1, une galaxie identifiée près du quasar B.

Les astronomes Young et associés ont découvert que la galaxie G1 fait partie d'un amas de galaxies, ce qui accentue la déflexion gravitationnelle et que cela pouvait expliquer la distance observée entre les images. Finalement, une équipe dirigée par Marc V. Gorenstein a observé des jets relativistes identiques à de très petites échelles sur les deux quasars A et B en 1983, en se servant du VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Par la suite, des observations plus détaillées au VLBI ont démontré que la parité inverse attendue de l'image du jet B était comparable à celle du jet A. La différence entre les images radio à grande échelle était attribuée à la géométrie spéciale nécessaire pour une lentille gravitationnelle, ce qui est constaté sur le quasar mais pas par toutes les émissions étendues de jets, telles que vues par le VLA près de l'image A.

Les très légères différences spectrales entre les quasars A et B peuvent être expliquées par différentes densités du milieu intergalactique des chemins pris par la lumière, résultant en une extinction différée.

30 années d'observation ont rendu évidente que l'image A du quasar atteignait la Terre 14 mois plus tard que l'image B correspondante, le résultat d'une différente longueur de parcours de la lumière d'environ 1,1 année-lumière.

En 1996, une équipe du Centre d'Astrophysique du Harvard-Smithsonian, dirigée par Rudy E. Schild a découvert des fluctuations anormales sur la courbure d'une des images, ce qui a conduit à une théorie controversée et non confirmable qu'il y aurait une planète d'une masse de 3 fois la Terre dans la galaxie qui sert de lentille. Les résultats restent spéculatifs car la probabilité d'un alignement qui amènerait à cette découverte ne se reproduira pas. Toutefois, si cela était confirmé, cela en ferait l'exoplanète la plus lointaine jamais détectée, à près de 4 milliards d'années-lumière.

En 2006, R. E. Schild suggéra que l'objet responsable de l'accrétion au cœur de Q0957+561 n'était pas un trou noir supermassif, comme on le croit généralement pour tous les quasars, mais un objet magnétosphérique en effondrement permanent. L'équipe de Schild au Harvard-Smithsonian affirme que « Ce quasar semble être dynamiquement dominé par un champ magnétique, ancré en interne à un objet en rotation, supermassif, central et compact » (R. E. Schild).

Serge Brunier est un reporter, photographe et écrivain français, spécialisé dans la vulgarisation de l'astronomie auprès du public francophone.



Il collabore avec le magazine *Science & Vie* et est chroniqueur sur la radio France Info. Il participe également au journal de BFMTV pour parler des actualités de l'astronomie. Il a écrit de nombreux ouvrages illustrés en rapport avec l'astronomie. Promoteur de la recherche scientifique dans le domaine de l'astronomie et de l'astrophysique, il défend l'exploration du système solaire par des sondes spatiales, mais il est par contre un adversaire des vols habités dans l'espace.

L'astéroïde 10943 a été nommé *Brunier* en son honneur.

Photo et explications par Serge Brunier :

Ces deux petits points lumineux sont célèbres depuis qu'ils ont été découverts, dans la constellation de la Grande Ourse, en 1979. QSO 0957+561 est depuis connu sous le nom de « Quasar double », il s'agit du premier mirage gravitationnel observé par les astronomes, une fantastique « preuve en image » de la validité de la théorie de la relativité générale. Ces deux points lumineux sont deux images d'un même quasar, situé à 8,7 milliards d'années-lumière d'ici. Invisible sur cette image, une galaxie se trouve dans la ligne de visée du quasar, à 3,7 milliards d'années-lumière, et sa masse déforme l'espace-temps autour d'elle. Résultat, la lumière du quasar lointain est déviée, et passe de part et d'autre de la galaxie.

Cette découverte a marqué les astronomes à l'époque, et je suivais avec passion une « manip » tentée par des équipes un peu partout dans le monde : essayer de mesurer l'écart temporel entre les deux images. En effet, la distance parcourue par la lumière étant différente, le temps de parcours de celle-ci devait différer. En France, c'est l'astronome Jean Schneider qui avait tenté cette extraordinaire expérience. Il a fallu huit ans à son équipe pour trouver ce décalage temporel, en mesurant les infimes variations de luminosité du quasar : résultat, 417 jours...

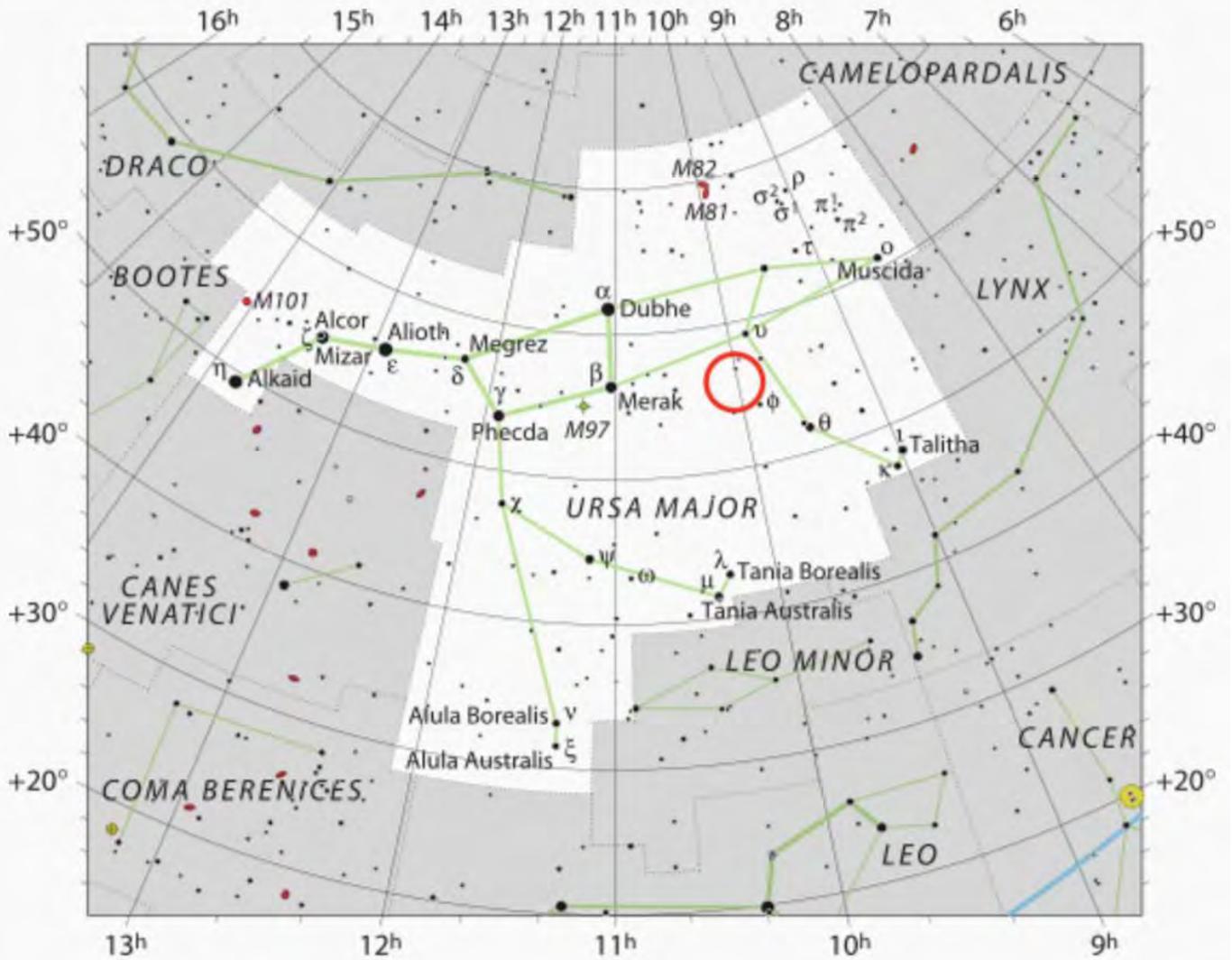
Les deux images que vous voyez sur cette photo sont donc décalées d'un peu plus d'un an, la différence de parcours des deux faisceaux lumineux est d'un peu plus d'une année-lumière.

L'image ci-après a été prise avec le télescope de 1 mètre C2PU de l'Observatoire de la Côte d'Azur, Nikon D810 A, une heure de pose à 2000 ISO, pendant la Pleine Lune. Pour les amateurs, les deux objets sont de magnitude 17 et sont séparés par 6 secondes d'arc.



Ces deux petits points lumineux, avec un axe légèrement en biais, presque au centre de l'image, sont deux visualisations du même objet, le quasar QSO 0957+561, situé à environ 8,7 milliards d'années-lumière de nous. On voit un double de l'objet grâce à l'effet de lentille gravitationnelle, prédit par Albert Einstein dans sa théorie de la Relativité Généralisée, publiée le 2 décembre 1915.

Localisation dans la constellation : Grande Ourse



Localisation du quasar QSO 0957+561 dans la constellation de la Grande Ourse