

Les télescopes gravitationnels.

Conférence donnée par

Laurent Nottale

Prix Digital Equipment France de la SFSA 1987

aux Journées Scientifiques de la Société Française des Spécialistes en Astronomie,
Toulouse, 26-28 Octobre 1987.

En 1919, deux expéditions dirigées par Eddington furent envoyées dans l'hémisphère Sud vers les petites îles de Sobral et de Principe pour observer l'éclipse de Soleil du 29 Mai. Leur but: tester l'une des prédictions les plus surprenantes de la théorie de la Relativité Générale, définitivement mise au point par Einstein trois ans auparavant: la déviation des rayons lumineux par une masse, devant se traduire par un déplacement apparent des étoiles de $1''75$ au bord du Soleil. La vérification spectaculaire de cette prédiction contribua fortement à porter la nouvelle théorie à l'attention du grand public dans les années 20. Il fallut pourtant attendre plus de 50 ans avant que de nouveaux effets de "lentille gravitationnelle" soient mis en évidence, non plus à l'échelle du système solaire, mais dans le domaine extragalactique.

La Relativité Générale, en tant que théorie relativiste de la gravitation, est un cadre naturel pour la cosmologie, la gravitation étant l'interaction dominante dans l'Univers à grande échelle. A partir du principe cosmologique d'homogénéité et d'isotropie, des modèles d'Univers à densité constante (pour une époque donnée) peuvent être construits (Friedmann-Robertson -Walker). Dans le cadre de ces modèles, les relations générales entre les observables fondamentales- décalage vers le rouge, luminosité, diamètre, température du rayonnement de corps noir cosmique -sont établies, et l'on connaît l'accord extraordinaire obtenu entre les prédictions théoriques (expansion de l'Univers et rayonnement fossile issu de l'Univers primordial) et les faits d'observations cosmologiques fondamentaux: loi de Hubble de proportionnalité entre distance et décalage vers le rouge des galaxies et découverte du corps noir à 3 Kelvin.

Cependant, même dans cet Univers simplifié supposé totalement uniforme, les prédictions relativistes réservent déjà des surprises. Si dans l'Univers proche le concept de distance reste bien défini, au sens où des méthodes de mesure différentes donnent des résultats identiques, il n'en est plus de même pour les très grands décalages spectraux. Ainsi la distance mesurée à partir des diamètres apparents des astres n'est plus une fonction uniforme du décalage spectral z et elle diffère de la distance mesurée à partir de la luminosité par un facteur 25 pour $z=4$ (rappelons que le décalage spectral des quasars les plus lointains actuellement observés dépasse maintenant largement $z=4$). La cause profonde de ce comportement est précisément un phénomène d'optique gravitationnelle: la densité moyenne non nulle de matière dans l'Univers a pour effet de focaliser les

rayons lumineux d'un même faisceau, qui va devenir convergent d'autant plus tôt que cette densité est grande; ainsi le diamètre apparent d'une source, qui diminue tout d'abord normalement quand on l'éloigne, devient constant et finalement augmente avec l'éloignement. C'est l'Univers dans son ensemble qui joue le rôle de lentille gravitationnelle!

Pourtant il s'agit là d'un modèle très simplifié de l'Univers, où l'homogénéité et l'isotropie, supposées valables à toute les échelles, impliquent l'universalité de la loi de Hubble, en particulier son indépendance de la ligne de visée. Notre vision de l'Univers qui se dégage des observations les plus récentes est toute autre: la distribution de la matière est fortement hétérogène et structurée jusqu'à des échelles de plusieurs centaines de Mégaparsecs, et ce n'est qu'au delà que peut s'appliquer strictement le principe cosmologique. La matière est concentrée en étoiles, qui se regroupent par dizaines ou centaines de milliard pour former les galaxies, ces constituants élémentaires de l'Univers pour la cosmologie observationnelle (il est cependant remarquable que les travaux de recherche récents sur l'optique gravitationnelle ont redonné un rôle cosmologique aux étoiles individuelles via les effets de "microlentilles" dont nous parlerons plus loin). Les galaxies sont rassemblées en groupes ou amas de galaxies de quelques Mpc de rayon, eux-mêmes constituant des superamas s'étendant sur quelques dizaines de Mpc. Les dix dernières années ont vu s'accroître exponentiellement le nombre de vitesses radiales de galaxies mesurées, ce qui a permis d'étudier la distribution des galaxies en trois dimensions, et non plus seulement d'après leurs positions projetées sur la sphère céleste. Une surprise de taille en est résultée, avec la découverte de vastes régions vides, de filaments et de "feuilletés" de galaxies dépassant parfois la centaine de Mpc.

Quelles vont être les conséquences de ces hétérogénéités sur la propagation des rayons lumineux, et donc sur les observations extragalactiques lointaines? C'est la question à laquelle tente de répondre un nombre croissant de travaux aussi bien théoriques qu'observationnels, les progrès les plus marquants résultant souvent d'un aller-retour entre ces deux approches. Considérons tout d'abord les prédictions théoriques. La manière la plus générale d'aborder le problème consiste à écrire les équations de l'optique géométrique en Relativité Générale puis à tenter de les résoudre pour des distributions de matière hétérogènes. On retrouve dans ces équations les deux effets déjà envisagés: la matière contenue dans un faisceau lumineux le rendra plus convergent, tandis que des masses extérieures, déviant différentiellement les rayons lumineux qui le composent, provoqueront son cisaillement, sorte d'effet de marée subi par la lumière. Le contenu matériel et énergétique de l'Univers change (détermine) sa géométrie dont dépend à son tour la propagation de la lumière. Une galaxie ou un amas de galaxies situé sur la ligne de visée nous joignant à une source lointaine va alors agir comme une "lentille gravitationnelle" sur cette source. Mais ce n'est qu'un cas particulier du phénomène général évoqué ici: toute fluctuation de densité par rapport à la densité moyenne de l'Univers va perturber les relations entre le décalage spectral et la luminosité ou le diamètre des astres. Dans le cas où une source se trouve située derrière une grande structure vue par la tranche, ou encore derrière plusieurs groupes ou amas de galaxies successifs, ce n'est plus d'une simple lentille qu'il s'agit, mais bien d'un véritable "téléscope" (au sens de réfracteur) ou "banc

d'optique" gravitationnel. Un des principaux résultats théoriques que j'ai récemment obtenu a précisément consisté à établir des solutions analytiques pour la propagation d'un faisceau lumineux dans une telle situation.

Les effets d'optique gravitationnelle prévus par la théorie sont multiples: nous allons les passer en revue avant de nous tourner vers les observations pour constater que beaucoup d'entre eux ont effectivement été mis en évidence ces dernières années.

Le déplacement apparent d'une source sur la sphère céleste a déjà été évoqué plus haut. On l'observe au bord du soleil en comparant les positions relatives d'étoiles à 6 mois d'écart. Dans le domaine extragalactique, il se traduit par un effet beaucoup plus spectaculaire, celui de "mirage gravitationnel": dès les années 30, F. Zwicky avait compris que si la lentille était constituée par une galaxie dans son ensemble, plusieurs images d'une même source lointaine pouvaient être observées. Cette prédiction remarquable de la Relativité Générale réalise cette fois un véritable éclatement de la notion de distance, plusieurs trajets lumineux nous reliant à la source. Ainsi un même astre peut être vu simultanément en plusieurs positions différentes et surtout à plusieurs instants différents de son évolution, les écarts se comptant en mois ou en années: exprimé de façon imagée, un habitant d'un tel astre pourrait être vu simultanément enfant, adulte et vieillard, une possibilité qui semblait réservée à un film de science-fiction comme "2001, l'odyssée de l'espace"!

En plus de ces effets de multiplication d'images et de délai temporel, on s'attend à ce que les images soient déformées par le cisaillement. Un cas extrême de déformation correspond à l'alignement parfait entre source et défecteur qui étirerait et collerait les images au point de constituer un anneau. Dans la situation plus réaliste d'un léger défaut d'alignement on obtiendrait une image en forme d'arc de cercle...

Même s'il n'y a pas multiplication d'images, les excès de densité dans l'Univers vont provoquer une amplification (une atténuation pour une sous-densité) de la luminosité des sources situées derrière eux, et parallèlement un agrandissement, l'une et l'autre étant toujours liés par le théorème de conservation de la brillance superficielle (divisée par $(1+z)^4$, z étant le décalage spectral). Dans le cas d'une lentille couvrant une grande région du ciel, comme un amas ou un superamas de galaxies très riche, c'est tout le cône d'Univers situé derrière cet amas qui peut se trouver perturbé: la reconvergence des rayons lumineux diminue le volume accessible, mais cet effet est dans la plupart des cas plus que compensé par l'amplification qui va permettre d'atteindre des objets beaucoup plus faibles, donc beaucoup plus lointains. La densité superficielle numérique de sources lointaines va s'en trouver localement augmentée; inversement la recherche d'objets très lointain à la limite des luminosités apparentes accessibles risque d'être soumise à un important effet de sélection, sachant que seront observées préférentiellement les sources plus brillantes précisément à cause des amplifications gravitationnelles.

Un type d'effet différent mais non moins intéressant est la possibilité de variabilité due au mouvement relatif d'une étoile ou d'un objet compact devant la ligne de visée d'une source de faible extension. Une telle "microlentille" peut agir comme une véritable loupe différentielle sur un objet très structuré comme un quasars, amplifiant plus ou moins des régions d'émission différentes de la

source et donc révélant sa structure.

Enfin il ne faut pas oublier que la gravitation n'a pas que des effets sur la luminosité ou le diamètre des sources lointaines mais aussi sur leur décalage spectral. On s'attend à ce que le centre d'un amas de galaxie soit décalé vers le rouge par rapport à une galaxie de champ située à la même distance: c'est une généralisation du décalage vers le rouge d'Einstein qui constitue un des trois tests classiques de la Relativité Générale. Mais il y a mieux: un rayon lumineux venant de l'infini et traversant le puits de potentiel en expansion différentielle d'un amas ou d'un superamas va également subir un décalage spectral excédentaire. Un tel effet est au temps ce que la déviation des rayons lumineux est à l'espace: ceci est corroboré par le fait remarquable, que j'ai pu démontrer de la manière la plus générale, que la prédiction relativiste est exactement le double du résultat obtenu dans un calcul Newtonien, comme c'est déjà le cas pour la déflexion de la lumière. Cet effet, trop faible pour s'appliquer à des galaxies, pourrait néanmoins diminuer localement la température du corps noir cosmologique de manière observable dans certaines conditions particulières.

Nous allons voir maintenant que la plupart des effets de lentille gravitationnelle prédits par la théorie ont été effectivement observés ces dernières années. Le domaine des observations de lentilles gravitationnelles est en effet en pleine effervescence. Tout a commencé en 1979 avec la découverte par Walsh, Carswell et Weymann du premier mirage gravitationnel, le quasar double 0957+561: deux quasars pratiquement de même luminosité séparés de 6 secondes d'arc et ayant exactement le même spectre et le même décalage spectral $z=1.41$. Quelques mois plus tard la galaxie et l'amas responsables de cette multiplication d'image furent découverts indépendamment par Stockton et Young et al. D'autres candidats ont rapidement suivi, en particulier le quasar triple PG1115+080, dans l'analyse duquel se sont particulièrement illustrées des équipes françaises: mise en évidence de nouvelles images (Vanderriest et al., 83; Foy et al., 85), de la variabilité et du délai temporel (Vanderriest et al., 86).

Le nombre total de mirages probables connus actuellement est d'une dizaine, seulement 4 d'entre eux pouvant être considérés comme quasi certains (observation de spectres individuels des images, du défecteur, modèle cohérent rendant compte de toutes les caractéristiques de la configuration dans tous les domaines de longueur d'onde). Jusqu'à une époque récente il s'agissait toujours de quasars, leurs grandes distances et luminosités, leur apparence quasi-stellaire et les raies d'émission larges et intenses de leurs spectres en faisant des sources idéales. Pourtant j'avais suggéré avec H. Karoji, dès 1976, que des effets statistiques d'amplification par les amas de galaxies les plus riches sur des galaxies plus lointaines existaient de manière significative: la méthode originale que nous avons mise au point et qui a resservi par la suite, consistait à comparer dans un échantillon donné les objets situés derrière des amas à ceux dont la ligne de visée n'avait traversé aucune hétérogénéité avant de nous parvenir.

De plus des effets individuels sur des galaxies peuvent également être repérés: l'un d'entre eux concerne un objet extraordinaire, le quintette de galaxies VV172, et permet de visualiser plusieurs des effets de lentille décrits plus haut. Le cas de ce groupe compact de 5 galaxies de luminosité et de diamètres équivalents faisait figure de mystère depuis la découverte dans les années

60 que l'une d'entre elles possédait un décalage vers le rouge plus de deux fois supérieur aux quatre autres. L'existence d'autres exemples de "quintettes discordants" comme ceux de Stefan et de Seyfert, rendaient l'hypothèse de la simple projection fort improbable statistiquement. La solution d'un tel puzzle a été trouvée récemment par F. Hammer et moi-même: la lentille gravitationnelle formée par le quartette compact de galaxies peut amplifier et agrandir une galaxie plus lointaine au point de la rendre semblable à elles; quant au problème statistique posé par tous les cas connus de ce type, il disparaît en prenant en compte l'effet de changement de densité numérique!

Mais peut-on envisager une multiplication d'images sur une galaxie dans son ensemble? Seules des galaxies situées à des distances qui sont en général du domaine des quasars pourraient donner lieu à un tel mirage. Les radiogalaxies lointaines du catalogue 3CR, découvertes par Spinrad et ses collaborateurs, sont des candidats idéaux, avec leurs décalages spectraux supérieurs à 1 et atteignant 1.85. Plusieurs arguments m'ont conduit à proposer avec F. Hammer que les effets d'amplification gravitationnelle par les amas et les galaxies (parfois avec multiplication d'images) perturbaient significativement les observations de cet échantillon lointain: l'énorme surluminosité de ces objets (d'un facteur dépassant 100), difficile à rendre compte intégralement par l'évolution; la mise en évidence d'un biais de sélection dû aux amplifications sur les galaxies les plus brillantes des amas et son extrapolation à $z > 1$ (dans la recherche de sources à la limite de détectabilité, celles qui sont amplifiées seront découvertes préférentiellement); le fait que de la matière (galaxies ou amas) soit effectivement observée sur la ligne de visée de beaucoup de ces objets. Un des meilleurs candidats semblait être 3C324, dans le spectre duquel j'avais pu identifier, en plus des raies à $z=1.21$, un autre système de raies à $z=0.84$, suggérant une superposition d'objets. Seules des observations au télescope de 3m60 CFH pouvaient faire avancer la question, grâce à la qualité d'images exceptionnelle du site. Deux mois seulement après notre prédiction, les premières observations CCD faites par O. Le Fèvre avec un seeing de 0.6" montrèrent exactement la configuration attendue: une structure en 3 composantes alignées, la lentille éventuelle entourée par ce qui pourrait être les deux images principales. Devant la difficulté d'obtenir des spectres individuels de chaque composante (objets de magnitude ≈ 23 séparés par moins d'une seconde d'arc), l'existence de raies d'émission aux deux décalages spectraux suggérait des observations en filtres interférentiels centrés sur ces raies. Faites moins d'un mois plus tard, elles apportaient un argument très fort en faveur de l'hypothèse du mirage gravitationnel: dans la raie à $z=0.84$, seule demeure la composante centrale, tandis que les composantes extérieures sont seules observées à $z=1.21$. Bien qu'il faille rester conscient que seule l'obtention de spectres de chaque composante permettrait d'en acquérir la certitude, il semble bien qu'il s'agisse du premier cas connu de multiplication d'image sur une galaxie géante.

La nature des effets gravitationnels escomptés change avec la structure des défecteurs. Si d'une grande structure comme un amas, un superamas ou un filament de galaxies on n'attend qu'un effet d'amplification -et ses conséquences statistiques- sans multiplication d'images, une galaxie géante ou le centre compact d'un amas très riche pourra multiplier et déformer les images à l'échelle

de la seconde d'arc. Par contre la séparation des images due à une étoile ou un objet compact n'est que de l'ordre de 10^{-6} secondes d'arc, inatteignable actuellement même en VLBI. Pourtant de tels déflecteurs sont susceptibles de provoquer un effet original et tout aussi intéressant: une variabilité et une amplification différentielle capable de changer la nature apparente d'une source. J'ai proposé en 1985 que de tels effets de "microlentille" n'étaient pas à rechercher dans de nouveaux objets encore inconnus, mais expliquaient fort bien l'ensemble des propriétés de certains quasars violemment variables en optique (OVVs) comme le BLLac 0846+51. Ainsi la ligne de visée qui nous lie à cet objet traverse une galaxie proche, et on peut montrer que l'amplification par un corps compact de 10^{-2} masses solaires passant devant la région émettant le continu rend compte de la variation de luminosité (4 magnitudes en moins d'un mois); du changement de spectre, BLLac (sans raies d'émission) au maximum, quasar au minimum; et de la variation de couleur et de polarisation, toujours corrélées aux variations de luminosité.

Plusieurs objets du même type sont en cours d'étude, dont l'un particulièrement remarquable: l'existence d'une pseudo-périodicité dans la courbe de lumière peut être interprétée comme due au passage d'une étoile double sur la ligne de visée, si bien que les variations de luminosité reflèterait son mouvement képlérien. Non seulement une telle hypothèse permet de reproduire avec une grande précision la courbe de lumière passée, mais aussi de prédire son évolution future, ce qui est une situation très rare dans le domaine extragalactique: il nous suffit maintenant d'attendre une vingtaine d'années pour être définitivement fixés!

Parallèlement à ces effets sur des objets individuels, il se confirme de plus en plus que des effets statistiques d'amplification perturbent significativement nos observations des objets les plus lointains. C'est le cas des galaxies les plus brillantes des amas, des radiogalaxies de $z > 1$ du 3CR, mais aussi des quasars. Ainsi peut on appliquer les derniers résultats de la théorie des lentilles gravitationnelles multiples aux QSOs à raies d'absorption: on trouve alors une forte corrélation entre la magnitude "absolue" de ces objets et la prédiction de l'amplification par des déflecteurs multiples situés aux décalages spectraux d'absorption. Cet effet rend compte partiellement de l'évolution apparente des quasars.

Rappelons pour finir la découverte récente de ce qui pourrait s'avérer comme le plus beau et spectaculaire effet de lentille gravitationnelle: l'arc extragalactique géant dans l'amas A370 (Soucail, Fort, Mellier, Picat, Mathez). D'autres structures du même type ont ensuite été observées dans d'autres amas (2244-02, A2218). En ce qui concerne A370, la même équipe a maintenant confirmé par la mesure de son décalage spectral que l'arc est situé derrière l'amas; de plus le modèle de lentille établi par F. Hammer rend compte en détail de sa forme et de sa luminosité. Il s'agit donc bien d'un "anneau d'Einstein", l'image étirée en arc de cercle d'une galaxie lointaine par les régions centrales compactes de l'amas, effet longuement recherché depuis sa prédiction par Zwicky dans les années 30.