UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des sciences
Institut d'astrophysique et de géophysique

Aspects statistiques du phénomène de lentille gravitationnelle dans un échantillon de quasars très lumineux

Dissertation présentée par
Jean-François Claeskens
pour l'obtention du grade de
Docteur en sciences

Décembre 1998

Extrait du Bulletin de la
SOCIETE ROYALE DES SCIENCES de Liège
Vol. 68 (1-4) 1999

Pour avoir mis le pied
Sur le cœur de la nuit
Je suis un homme pris
Dans les rets étoilés.

J'ignore le repos
Que connaissent les hommes
Et même mon sommeil
Est dévoré de ciel.

J. Supervielle, extrait de "Vivre"

Remerciements

Je remercie très chaleureusement mon directeur de thèse Jean Surdej pour l'aventure qu'il m'a donnée de vivre au Chili ou à Cointe en quête de mirages gravitationnels. Ses nombreux conseils judicieux m'ont initié aux arcanes de l'astronomie extragalactique observationnelle et m'ont toujours laissé la liberté d'apercevoir la solitude du chercheur; ils m'ont guidé tout au long de ce travail lors de décisions parfois difficiles à prendre. Je lui suis très reconnaissant pour son incroyable disponibilité et pour l'énergie qu'il a toujours pu me consacrer aux moments les plus cruciaux. Il m'a démontré que la recherche scientifique n'exclut pas les plus grandes qualités humaines.

Sans une très fructueuse collaboration avec Alain Smette, l'étude de l'effet de lentille parmi les DLAs et le Chapitre 6 de ce travail n'auraient jamais vu le jour. Ma reconnaissance lui est tout particulièrement adressée.

Je souhaite également remercier personnellement Eric Gosset, Damien Hutsemékers et Marc Remy pour leur disponibilité à répondre à mes nombreuses questions et les intéressantes discussions que j'ai pu avoir avec eux, très souvent à l'improviste.

Mes remerciements vont aussi à l'Observatoire Européen Austral (E.S.O.), à Jean-Pierre Swings et à Jean Surdej qui m'ont permis de connaître l'expérience unique de vivre dans un observatoire astronomique sous l'un des plus beaux cieux du monde, et de découvrir par la même occasion la nature grandiose des Andes. Mon travail a pu aboutir grâce au soutien financier du Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S.).

Enfin, je désire remercier tous les Membres du Jury pour l'intérêt qu'ils témoignent à mon travail et le temps qu'ils y ont consacré.

Finalement, je voudrais remercier vivement mon épouse Armélinda et mes parents, pour leur patience et parfois leur sacrifice, et pour leur constante affection durant les années de mûrissement de ce travail.

Table des matières

Résumé

Notre travail forme un triptyque consacré à l'étude du phénomène de lentille gravitationnelle au sein d'échantillons de quasars très lumineux.

Le premier volet est dévolu à la détermination ou à la contrainte de certains paramètres astrophysiques et cosmologiques (tels que l'ellipticité et la dispersion des vitesses dans les galaxies-lentilles et la constante cosmologique), au moyen d'une analyse statistique par maximum de vraisemblance des images multiples présentes dans un échantillon de 1164 quasars très lumineux (Highly Luminous quasars, HLQs). Cette technique permet de prendre en compte simultanément leurs propriétés de configuration telles que le nombre d'images et leur séparation angulaire, la détection éventuelle de la lentille et de son redshift. L'information relative aux seules propriétés de configuration de mirages découverts par ailleurs est également retenue. Les déflecteurs sont modélisés par des ellipsoïdes isothermes singuliers (EIS), dont les paramètres sont ajustés pour reproduire les observations de mirages connus. Les biais observationnels tels que les biais de sélection instrumentaux et le biais en amplification sont soigneusement pris en compte dans le calcul de la probabilité d'observation d'un mirage. Les effets de l'extinction des quasars par de la poussière dans les galaxies-lentilles sont également étudiés. Le résultat principal réside dans la détermination d'une limite supérieure à la valeur de la constante cosmologique : $\lambda_o(= \Lambda c^2/3H_o^2)$ doit être inférieure à 0,55 avec une degré de confiance de 95%. Les valeurs déterminées pour d'autres paramètres, tels que l'ellipticité et la dispersion des vitesses dans les galaxies-lentilles, sont entièrement compatibles avec celles publiées indépendamment dans la littérature. Cela témoigne de la cohérence des résultats. D'autre part, à l'aide du modèle de lentille ponctuelle et du même échantillon, nous déduisons que la densité cosmologique associée à une hypothétique population uniforme d'objets sombres et compacts est inférieure à 0,01 (avec un degré de certitude de 99,7%), si leur masse est comprise entre $10^{9,9}$ et $10^{12,1}$ masses solaires.

Le second volet traite des associations angulaires étroites (quelques secondes d'arc) entre des quasars situés à haut redshift et des galaxies d'avant-plan, dans le contexte du phénomène de lentille gravitationnelle. La corrélation observée s'explique alors par l'amplification du flux des quasars provoquée par les galaxies proches de leur ligne de visée. Nous montrons, en modélisant les galaxies par des sphères isothermes non singulières, dans quelles circonstances les associations quasar-galaxies sont les plus fortes et pourquoi les résultats observationnels publiés dans la littérature sont souvent discordants. Nous présentons également une nouvelle analyse de la présence du phénomène d'association dans un échantillon de 219 quasars brillants, dont une partie seulement avait déjà fait l'objet d'une étude (Van Drom et al. 1993). De la confrontation des surdensités observationnelles et des prédictions théoriques, il résulte un accord globalement satisfaisant, étant données les grandes barres d'erreur observationnelles. Quelques données individuelles sont cependant significativement

déviantes et devront être confirmées au sein d'un échantillon beaucoup plus vaste (environ 1500 HLQs) avant qu'une conclusion définitive puisse être tirée. Le nombre d'associations quasar-galaxies induites par le phénomène de lentille gravitationnelle est beaucoup moins sensible aux valeurs des paramètres astrophysiques et/ou cosmologiques que la statistique des images multiples de quasars.

Dans le troisième et dernier volet de notre travail, nous recherchons l'influence attendue du phénomène de lentille gravitationnelle sur la détermination de la densité cosmologique d'hydrogène neutre en fonction du redshift, $\Omega_{\rm HI}(z)$, réalisée à partir de la détection d'absorptions Ly_α saturées (Damped Lyman alpha Absorptions, DLAs) dans le spectre des quasars. Les nuages responsables des DLAs sont en effet probablement associés à des galaxies spirales (Wolfe 1995) dont le halo peut engendrer des effets de lentille gravitationnelle. Le "phénomène de contournement" dû à la focalisation dévie la ligne de visée d'un quasar d'arrière-plan à l'extérieur de la région centrale du déflecteur, ce qui réduit la probabilité d'absorption. D'autre part, le phénomène de biais en amplification augmente la probabilité qu'un quasar brillant présente un DLA dans son spectre. Nous négligeons l'effet de microlentille et l'extinction due à la poussière éventuellement associée au DLA. Nous modélisons les halos de galaxies spirales par des sphères isothermes singulières et nous montrons que la compétition entre les deux effets contraires décrits ci-dessus entraîne dans les recensements de DLAs actuellement disponibles une surestimation prédite de $\Omega_{\rm HI}$ négligeable à haut redshift ($z \sim 1{,}5$), et inférieure à 35% à plus faible redshift. Cependant, si les DLAs étaient recherchés autour d'un redshift de 0,5 et devant des quasars distants de magnitude bleue $b_q \sim 16$, l'excès attendu de DLAs impliquerait une surévaluation de $\Omega_{\rm HI}$ de 170%. Nous vérifions ensuite la présence de traces du phénomène dans les échantillons actuellement disponibles. Le très petit nombre de DLAs détectés compromet la certitude statistique, mais la non-uniformité de leur répartition dans l'échantillon de DLAs à *faible* redshift va dans le sens attendu sous l'hypothèse de l'action du phénomène de lentille gravitationnelle. Enfin, nous estimons la probabilité de découvrir un mirage gravitationnel parmi des DLAs existants : elle peut s'élever à 30% pour certains objets.

Summary

This work consists of a triptych devoted to the study of gravitational lensing in bright quasar samples.

The first part concerns the determination or the constraint of some astrophysical and cosmological parameters (such as the ellipticity or velocity dispersion of the lensing galaxies and the cosmological constant), applying the maximum likelihood statistical analysis to an optical sample of 1164 highly luminous quasars (HLQs). This technique allows to make use of all the information available about a given multiply imaged QSO (number of images, angular separation, detection of the lens or of its redshift). The data concerning other gravitational lenses are also included, if the selection criteria are known. We model the deflector as a singular isothermal ellipsoid (SIE), whose parameters are tuned to reproduce the observations of the individual mirages. Observational biases, like instrumental angular selection function or the magnification bias, are properly taken into account in the computation of the lensing probability. The effects of possible extinction of the quasar image(s) by dust in the lens are also investigated. Our main result is a limit on the cosmological constant, $\lambda_o < 0.55$, at the 95% confidence level ($\lambda_o = \Lambda c^2/3H_o^2$). The determinations of other astrophysical parameters, such as the ellipticity or the velocity dispersion of the lensing galaxies, are in good agreement with the values independently published in the literature. Using the same optical sample and the Schwarzschild lens model, we also constrain the cosmological density of a uniform population of putative dark compact objects to be less than 1% in the mass range $10^{9.9}$ - $10^{12.1}$ solar masses, at a 99.7% confidence level.

In the second part, we investigate the close projected associations between high redshift QSOs and foreground galaxies. In the framework of gravitational lensing, the observed correlation is due to the flux amplification of background quasars by galaxies located close to their line-of-sight. Assuming the galaxies are well described by non singular isothermal spheres, we show under which circumstances the expected QSO-galaxy associations turn out to be the most important, how we should observe them and why published observational results are often discordant. We also present three bias-free samples consisting of 219 different HLQs. Only one of them had already been analysed before (Van Drom et al. 1993). The agreement between the published galaxy overdensities and the theoretical predictions is found to be satisfactory, given the large expected observational error bars. The confirmation of some significantly deviant data points (e.g. Webster & Hewett 1990) should be performed in a much larger and well defined sample of about 1500 HLQs ($M_V \sim -29$), before definite conclusions can be drawn. The QSO-galaxy associations induced by gravitational lensing are much less sensitive to cosmological or astrophysical parameters than the statistics of multiply-imaged HLQs.

In the last part of our study, we search for the influence of gravitational lensing on the determination of the cosmological density $\Omega_{\rm HI}$ of neutral hydrogen, made from Damped Lyman alpha Absorptions (DLAs) surveys in quasar spectra. Indeed, the intergalactic clouds responsible for the DLAs are probably associated with spiral galaxies (Wolfe 1995). Gravitational lensing by the halo of spiral galaxies produces first a "by pass" effect, causing the lines-of-sight to background QSOs to avoid the central part of the galaxy disk and the optical depth of absorption to decrease, and secondly a magnification bias which increases the probability for a bright QSO to be lensed and therefore to exhibit a DLA in its spectrum. Neglecting extinction by dust and microlensing and assuming the halos are isothermal singular spheres, we show that the competition between the two opposite effects leads, in the present DLA samples, to an overestimation of $\Omega_{\rm HI}$ that is negligible at high redshift ($z \sim 1.5$) and lower than 35% at lower redshifts. However, the expected overestimation of $\Omega_{\rm HI}$ can be as large as 170% when DLAs are searched at $z \sim 0.5$ in the spectra of bright ($b_q \sim 16$) and distant ($z_s > 1$) quasars. We then check if presently available DLA samples are really affected by gravitational lensing. Despite the very small number statistics, we find some possible indications of the expected gravitational lensing effects in the low redshift sample. Finally, we estimate the probability that a QSO with a DLA is multiply imaged. It can be as high as 30% for some observed DLAs.

Listes des symboles et des abréviations

Symboles employés dans cet ouvrage

La liste ci-dessous reprend les symboles les plus fréquents. Les notations en gras représentent des vecteurs.

- A : amplification lumineuse.
- A_μ : amplification lumineuse par effet de microlentille.
- $A_{M\mu}$: amplification lumineuse provoquée par les effets conjugués d'un macro et d'un microdéflecteur.
- C_{sel} : complétude des mirages gravitationnels dans un échantillon de quasars.
- c : vitesse de la lumière.
- $\boldsymbol{b}$: paramètre d'impact du rayon lumineux dans le plan du déflecteur.
- b_o : distance caractéristique dans le plan du déflecteur (par exemple le rayon d'Einstein).
- b_c : rayon du noyau de cœur d'une galaxie.
- b_L : rayon optique d'une galaxie.
- b_q : magnitude bleue du quasar.
- b_s : magnitude du coude ou du seuil dans la description en double loi de puissance de la fonction $N_q(b_q)$.
- G : constante de la gravitation.
- H_o : constante de Hubble.
- L : luminosité (des galaxies).
- L_* : luminosité caractéristique de la distribution de Schechter.
- N ou N_{HI} : densité de colonne d'hydrogène neutre.
- $N_q(b_q)$: nombre de quasars de magnitude bleue b_q par degré carré sur le ciel et par intervalle de magnitude.
- M : masse ou magnitude absolue.
- M_* : magnitude absolue caractéristique de la distribution de Schechter.
- $M_\odot$: masse solaire.
- Mpc : mégaparsec = 3,26 10^6 années-lumières = 3,086 10^{19} km.
- q : surdensité des galaxies.
- X : distance d'absorption.

- $\boldsymbol{x}$: position normalisée dans le plan du déflecteur.
- $\boldsymbol{y}$: position normalisée dans le plan de la source.
- z : redshift, *décalage vers le rouge des raies spectrales d'un objet astrophysique.*
- z_s : redshift de la source (éventuellement un quasar).
- $\boldsymbol{\alpha}$: angle de déflexion.
- α : exposant de la fonction de luminosité de Schechter ou de la fonction $N_q(b_q)$ pour $b_q < b_s$.
- β : exposant de la fonction $N_q(b_q)$ pour $b_q > b_s$.
- γ : cisaillement ou exposant de la relation de Tully-Fisher ou de Faber-Jackson.
- ϵ : ellipticité d'une galaxie.
- $\boldsymbol{\theta}$: position angulaire d'une image par rapport au déflecteur.
- θ_E : rayon angulaire d'Einstein.
- $\boldsymbol{\theta}_s$: position angulaire de la source par rapport au déflecteur.
- κ : densité surfacique normalisée.
- κ_* : densité surfacique normalisée de microdéflecteurs.
- Λ : constante cosmologique.
- λ_o : constante cosmologique normalisée.
- Σ : densité surfacique ou section efficace.
- σ : dispersion des vitesses dans une galaxie.
- σ_* : dispersion des vitesses dans une galaxie L_*.
- ϕ : potentiel gravitationnel ou fonction de luminosité.
- ϕ_* : normalisation de la distribution de Schechter.
- Φ : potentiel de Fermat.
- ψ : potentiel de déflexion.
- Ω_o : paramètre de densité cosmologique global et actuel de l'Univers.
- Ω_B : paramètre de densité cosmologique associé à la matière baryonique.
- $\Omega_{\rm HI}$: paramètre de densité cosmologique associé à l'hydrogène neutre.
- Ω_L : paramètre de densité cosmologique associé à des objets compacts, pouvant jouer le rôle de lentille gravitationnelle.
- Ω_{Lum} : paramètre de densité cosmologique associé à la matière lumineuse.

Abréviations fréquentes

- CCD : Charge-Coupled Device, *détecteur à transfert de charges.*
- CDM : Cold Dark Matter, *modèle de formation des grandes structures avec existence de matière sombre froide.*
- CFHT : Canada-France-Hawaï Telescope, *télescope Canada-France-Hawaï, situé à Hawaï.*

- DLA : Damped Lyman alpha Absorption, *absorption Lyman alpha saturée.*
- EIS : Ellipsoïde Isotherme Singulier (modèle de galaxie).
- ESO : European Southern Observatory, *observatoire européen austral.*
- FSA : Fonction de Sélection Angulaire.
- FWHM : Full Width at Half Maximum, *largeur à mi-hauteur de la fonction d'étalement du point ; elle décrit la qualité d'image ("seeing").*
- HES : Hamburg/ESO Survey.
- HDM : Hot Dark Matter, *modèle de formation des grandes structures avec existence de matière sombre "chaude" ou relativiste.*
- HLQ : Highly Luminous Quasar, *quasar intrinsèquement très lumineux.*
- HST : Hubble Space Telescope, *télescope spatial de Hubble.*
- LMT : Liquid Mirror Telescope, *télescope à miroir liquide.*
- NOT : Nordic Optical Telescope, *télescope optique nordique, situé à La Palma, Canaries.*
- PPV : Plus Proche Voisin.
- PSF : Point Spread Function, *fonction d'étalement du point.*
- QSO : Quasi Stellar Object, *objet quasi stellaire = quasar.*
- SDSS : Sloan Digital Sky Survey.
- SIS : Sphère Isotherme Singulière (modèle de galaxie).
- SINS : Sphère Isotherme Non Singulière (modèle de galaxie).
- S/N : Signal/Noise, *rapport signal-sur-bruit.*