Lumière et obscurité : comment (mieux) décoder l'Univers

La pollution lumineuse : un poison pour l'astrophysique

Denis Burgarella (denis.burgarella@lam.fr)

Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), UMR 7326 CNRS/Université Aix-Marseille, Pôle de l'Étoile Site Château-Gombert, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13388 Marseille Cedex 13

Pour les astrophysiciens, la lumière constitue le principal vecteur d'information pour comprendre l'Univers. La qualité des données obtenues est un paramètre majeur qui conditionne la qualité de l'interprétation et l'appréhension de la physique sous-jacente. Il est donc primordial de minimiser tous les effets parasites, qu'ils soient d'origine humaine ou non, qui polluent les signaux captés.

Dans cet article, nous verrons quelles informations astrophysiques sont contenues dans la lumière reçue du ciel. Puis nous analyserons ce que nous apprend l'absence de lumière dans certaines portions du spectre lumineux. Enfin, nous évoquerons la mobilisation pour diminuer la pollution lumineuse d'origine humaine.

La lumière est la « matière » de l'astrophysicien

C'est par le biais de la lumière que l'astrophysicien interprète l'information qu'envoie l'Univers à partir des objets lointains tels que les planètes, les étoiles ou les galaxies. La distribution spectrale observée peut s'étendre largement de part et d'autre du visible, sur tout l'ensemble du spectre électromagnétique, allant de l'ultraviolet jusqu'aux rayons X et aux rayons γ d'un côté, à l'infrarouge et au domaine radio de l'autre.

La lumière reçue des objets se présente sous la forme d'une émission continue principalement produite par les gaz à haute pression, en premier lieu les étoiles. Si l'on analyse la composition spectrale de la lumière reçue, on observe en général, en superposition sur un fond continu, un ensemble de raies, soit en absorption, soit en émission, correspondant chacune à une étroite bande de longueurs d'onde. Selon les caractéristiques du gaz (composition, température, pression, etc.), ces raies sont sombres ou claires (voir la figure 6, p. 90). Elles

© ESO, NASA et Poletta et al. (2007).

1. Distributions d'énergie spectrale pour diverses galaxies et un quasar (voir encadré, p. 87). Les images ont des cadres colorés qu'il faut associer aux spectres de même couleur. Le rayonnement à haute énergie (courtes longueurs d'onde) provient des disques d'accrétion autour des objets denses dont les trous noirs, ainsi que des étoiles les plus chaudes. Le rayonnement visible est essentiellement émis par les étoiles. En présence de poussière dans les zones de formation stellaire contenant des étoiles massives et chaudes, le rayonnement ultraviolet d'origine stellaire chauffe les grains de poussière qui réémettent dans l'infrarouge lointain. Enfin, des phénomènes non thermiques (par exemple les jets ou les supernovae) émettent dans le domaine radio. Certaines de ces émissions peuvent parfois être corrélées, ce qui suggère que le même phénomène physique en est l'origine. C'est, par exemple, le cas des rayonnements X et infrarouge lointain lors d'une flambée de formation stellaire.

2. Exemple de zone sombre en UV et en lumière visible. Barnard 68 (dans la constellation Ophiucus) est une nébuleuse située à environ 500 années-lumière de la Terre, et qui est observée ici du visible à l'infrarouge proche par le VLT ANTU à Paranal, au Chili. L'obscurcissement de la zone centrale causée par les grains de poussière est évidente dans le filtrage à courte longueur d'onde (entre 0,44 et 0,90 μm), puis elle diminue considérablement lorsque la longueur d'onde croît. Dans la bande infrarouge à 2,16 μm , on ne voit pratiquement plus de différence entre la zone centrale et la périphérie.

apportent une information cruciale sur la nature de la matière formant les astres très lointains, ainsi que sur la nature du milieu, interstellaire ou extragalactique, traversé entre l'astre observé et nous. Notons que l'absence de lumière dans certains domaines de longueur d'onde peut aussi apporter de l'information. Nous présentons ici des exemples d'utilisation de la lumière et de l'absence de lumière en astrophysique.

Il faut remarquer que la qualité des signaux que nous recevons est un élément fondamental pour bien interpréter le

message envoyé par les constituants de l'Univers, d'autant plus que nous étudions des sources lumineuses faibles, soit intrinsèquement, soit parce qu'elles correspondent à des objets extrêmement lointains.

Nous soulignons dans cet article la disparition actuelle du ciel nocturne liée à la pollution lumineuse. Ceci perturbe les travaux des astrophysiciens et influe également sur notre qualité de vie : observer une multitude d'étoiles dans un ciel nocturne sombre reste un privilège auquel il est malheureusement de plus en plus difficile, voire impossible, d'avoir accès.

La lumière pour comprendre la composition et l'histoire de l'Univers

Grains de lumière et grains de poussières

L'espace est rempli d'objets d'origines variées : étoiles, disques d'accrétion, gaz ionisé, etc. Comme déjà mentionné, la lumière utilisée par les astrophysiciens s'étend bien au-delà du domaine visible entre 0,4 et 0,8 μm . Par cette émission multi-longueurs d'onde, l'on cherche à remonter à l'ensemble des phénomènes physiques qui sont en action dans les objets étudiés.

Si nous prenons l'exemple des galaxies, leur distribution d'énergie spectrale peut s'étendre des rayons γ au domaine radio. Elle représente un résumé de l'évolution des étoiles, du gaz et des trous noirs que contiennent ces galaxies, qui peuvent être de forme et d'histoire très variable (voir encadré). Seul l'ensemble, ou tout au moins une grande partie du spectre électromagnétique, permet une vision complète de la physique des galaxies. Ceci est illustré sur la figure 1 pour trois types de galaxies et pour un quasar.

► Galaxies et quasars

Une galaxie est un ensemble autogravitant de plusieurs centaines de millions à plusieurs centaines de milliards d'étoiles. Dans l'Univers local, on peut classer les galaxies en trois grandes classes morphologiques : les galaxies spirales (figs. 1a et b), comme la Voie lactée ou Andromède, les galaxies elliptiques (fig. 1c), comme la galaxie Messier 87 au centre de l'amas de la Vierge, et les galaxies irrégulières comme le petit nuage de Magellan. La morphologie des galaxies a fortement évolué en fonction de l'âge cosmique, depuis les premières apparues il y a plus de 13 milliards d'années, jusqu'aux galaxies locales d'aujourd'hui.

Les quasars (fig. 1d) sont les objets les plus lumineux de l'Univers ; ils sont au cœur de certaines galaxies ; leur énergie provient de l'accrétion de matière sur un trou noir super-massif.

>>>

L'autre facette de la lumière est l'obscurité qui, loin d'être inutile, apporte également une information. Il peut d'ailleurs s'agir d'une obscurité partielle. Si l'on revient à l'exemple d'une galaxie, on peut voir des zones sombres dans le visible, qui toutefois ne sont plus observables en infrarouge (fig. 2). Pour mieux comprendre ces observations, il faut revenir au phénomène d'atténuation des lumières ultraviolette et visible lié à l'absorption par les poussières interstellaires quand elles présentent une très forte opacité (voir légende de la figure 1).

Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ? (ou paradoxe d'Olbers)

Sans aucun instrument, jumelle ou télescope, nos yeux sont suffisants pour constater que le ciel nocturne est sombre, mises à part les étoiles, les planètes et la bande galactique due au disque de la Voie Lactée vu par la tranche. Les hommes se sont longtemps interrogés sur l'explication de ce phénomène. Formalisé par Jean-Philippe Loys de Chéseaux en Suisse et Heinrich d'Olbers en Allemagne aux 18^e et 19^e siècles, il est maintenant connu sous le nom de « paradoxe d'Olbers ».

D'où provient le paradoxe apparent ? Partons de l'hypothèse que l'Univers est infini et uniformément rempli d'étoiles ou de galaxies, que la vitesse de la lumière est infinie et que la durée de vie des étoiles est suffisamment longue pour qu'on puisse les voir aujourd'hui. Quelle que soit la direction vers laquelle se porte notre regard, il devrait rencontrer une étoile ou une galaxie plus ou moins lointaine. La luminosité d'une étoile est indépendante de la distance : le ciel entier devrait avoir une luminosité comparable à celle d'une étoile !

De nombreux astronomes ont cherché des explications à ce paradoxe, comme William Herschel, qui a exclu l'effet des poussières interstellaires absorbantes que nous avons vu sur la figure 2. C'est le poète Edgar Allan Poe qui s'est approché au plus près d'une solution, dans « Eureka – un poème en prose ». Il écrit en 1848 : « si le cortège des étoiles était sans fin, la voûte céleste présenterait une luminosité uniforme ». Cette phrase contient les deux éléments à l'origine de la bonne explication : puisque l'Univers est né il y a 13,8 milliards d'années, aucune étoile n'a pu émettre de lumière avant. De plus, l'Univers

étant en expansion, la lumière des galaxies et des étoiles les plus lointaines est décalée vers l'infrarouge, dans un domaine de longueurs d'onde invisible avec nos yeux. Plus précisément, Edward Harrison a calculé que le nombre d'étoiles que contient l'Univers observable n'apporte pas suffisamment d'énergie pour que la nuit devienne claire.

La pollution lumineuse du ciel nocturne

Insidieusement, depuis environ un siècle, un drame a commencé à modifier notre environnement ancestral : l'impossibilité progressive, résultant de l'activité humaine, de jouir du ciel nocturne. Pour une population de plus en plus nombreuse sur la planète Terre, quand le Soleil se couche le ciel reste lumineux, contrairement à ce qui a pu se passer pendant l'histoire antérieure de l'humanité. Il peut même arriver qu'aucune étoile n'apparaisse.

Au-delà de tous les aspects scientifiques, écologiques ou même économiques reliés à la pollution lumineuse, nous touchons là sans doute à une limitation majeure de l'inspiration pour l'humanité, ce qui a été souligné par une résolution de l'Union Astronomique Internationale (UAI). La simple contemplation du ciel nocturne est une source de bien-être, d'inspiration artistique, mais également un élément essentiel dans le développement de la

pensée de toutes les civilisations. La peinture du ciel nocturne par Van Gogh (*La nuit étoilée*) est l'un des chefs-d'œuvre absolus de la peinture (fig. 3).

À proximité des villes et des zones d'activité

La lumière provenant de sources artificielles mal conçues ou réfléchies par le sol illumine le ciel où, diffusée par les particules de l'atmosphère (molécules, aérosols, etc.) elle produit une clarté globale de couleur orangée (fig. 4 gauche). Ce bain de photons d'origine anthropique est concentré dans les zones urbaines et le long des grandes voies de communication, perturbant tout l'écosystème, des humains aux animaux, insectes et oiseaux en particulier [1]. Le ciel nocturne urbain actuel n'aurait tout simplement pas pu engendrer le raisonnement qui a conduit à l'énoncé du paradoxe d'Olbers...

Cette pollution lumineuse est une aberration économique puisqu'elle constitue un gaspillage pur et simple d'énergie [2]. Des actions se multiplient pour tenter d'y remédier [3].

La carte montrée sur la figure 5 représente le nombre d'étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel en Europe. Elle a été construite en se fondant sur une carte donnant la magnitude limite atteinte à l'œil nu. Des paramètres comme l'altitude par rapport à l'horizon (extinction due à l'atmosphère) sont pris en compte.

3. *La nuit étoilée*, peinture de Vincent Van Gogh. Juin 1889 (Musée d'Art Moderne, New York, États-Unis).

4. Mise en évidence de la pollution lumineuse. En 2003, une panne d'électricité en Amérique du Nord a plongé une immense région dans l'obscurité. Ceci a permis d'obtenir cette image sans pollution lumineuse (à droite), à comparer à l'image habituelle (à gauche) à proximité de Goodwood, Ontario, Canada.

À proximité des sites d'observation astronomique

Les effets de la pollution lumineuse se font également sentir dans les grands observatoires, où un accroissement de la lumière parasite est perçu. Cela se traduit par une diminution du rapport signal-sur-bruit des signaux observés, et donc de la qualité des mesures que l'on peut réaliser sur les astres les plus faibles. D'autres perturbations du ciel ont été soulignées par l'UAI, par exemple les flashes des satellites [4].

Une commission de l'UAI a été créée pour la « Protection des sites d'observatoires existants et potentiels » [5]. Elle est le vecteur de l'UAI pour appliquer ses résolutions en faveur de la défense du ciel nocturne et du droit à la lumière des étoiles. Elle souligne aussi l'importance de protéger l'accès de tous les êtres humains au ciel nocturne non pollué, que ce soit pour des objectifs éducationnels, scientifiques, de santé ou tout simplement de loisir.

Une autre pollution lumineuse, moins ressentie par le grand public, est une perturbation importante pour les astronomes professionnels qui travaillent avec des outils spectroscopiques : la lumière artificielle provenant de l'éclairage urbain émet des raies intenses qui sont extrêmement gênantes, car elles se superposent aux raies plus faibles des objets étudiés et les masquent en partie. Ceci est illustré sur la figure 6, qui compare les spectres des mêmes objets observés dans un site urbain et dans un site à l'abri de la pollution humaine. C'est d'autant plus dommageable pour les scientifiques que l'analyse spectroscopique des raies des objets faiblement lumineux, comme

les galaxies, est une source d'information physique majeure qui renseigne par exemple sur leur composition chimique, leur température, leur taux de formation d'étoiles, ainsi que sur leur distance déduite du décalage spectral vers le rouge ("redshift").

Le problème de l'éclairage public : les LEDs sont-elles la solution ?

La pollution du ciel est en relation avec le système de l'éclairage public, qu'il est pourtant nécessaire d'assurer et même de développer dans certaines zones de la Terre (voir l'article de C. Weisbuch dans ce numéro, p. 54). Celui-ci se modifie progressivement sous l'effet de plusieurs facteurs de nature économique ou écologique. Ainsi, les diodes électroluminescentes (LEDs) sont et vont devenir de plus en plus utilisées, d'abord parce qu'elles sont économes en énergie, potentiellement développables en très grande quantité et à bas coût. En outre, elles sont populaires car elles permettent un éclairage qui a l'apparence d'une lumière blanche, donc proche de celle du Soleil. Il faut signaler que malgré tous leurs avantages, les LEDs à forte composante bleue ont pour les astronomes un aspect négatif. Ceci tient au fait que la lumière bleue est plus aisément diffusée que la lumière rouge, puisque la longueur d'onde est plus courte. La pollution

>>>

5. Carte montrant le nombre d'étoiles visibles durant la nuit en Europe. Les régions sombres correspondant à un ciel d'excellente qualité n'existent pratiquement plus, alors que les régions roses correspondant à la pollution lumineuse maximale (moins de 200 étoiles observables, contre environ 1500 normalement) sont relativement étendues. Dans les centres villes, il n'est pas rare d'observer moins de dix étoiles.

6. Exemple de pollution d'un spectre d'émission par l'éclairage urbain. Comparaison du spectre nocturne provenant d'un observatoire pollué (Asiago Astrophysical Observatory – Italie, en haut) et d'un site plus sombre (ESO-Paranal – Chili, en bas). Les identifications spectrales sont indiquées en rouge pour les sources artificielles et en bleu pour les sources naturelles. La lumière de l'éclairage urbain apparaît sous la forme des raies intenses du mercure et du sodium.

>>>

lumineuse créée par les LEDs illumine le ciel en bleu. Or le ciel est déjà bleu normalement, pour justement la même raison, puisqu'il reflète la lumière diffusée du Soleil. La pollution lumineuse produite par les LEDs bleues – du bleu sur fond bleu – est ainsi particulièrement gênante. Il faut noter aussi que l'efficacité des LEDs, souvent mal utilisées, peut entraîner des émissions plus intenses que celle des lampes classiques, ce qui renforce la pollution lumineuse qu'elles produisent. Pour ces raisons parmi d'autres, telles que la protection contre l'éblouissement, il est conseillé par l'*International Dark Sky Association* ainsi que par l'ANPCEN [3], de préférer des LEDs plus rouges et de limiter leur intensité.

Mesurer soi-même la pollution lumineuse

Il est possible d'estimer la valeur de la pollution lumineuse dans un endroit donné. Une échelle appelée échelle de Bortle permet de la mesurer. Comment faire, pratiquement ? Des applications pour Smartphone existent, que vous pouvez télécharger (p.ex. *Dark Meter Sky IYL15* [6]). Un site web permet également de comparer des cartes célestes à ce que vous observez pour obtenir la quantité de la pollution lumineuse et d'en construire une carte mondiale [7].

Pour cela, il faut choisir une carte qui ressemble le plus possible à ce que vous voyez. Puis, lorsque vous pensez avoir trouvé la bonne comparaison avec votre vision du ciel nocturne, laissez cette carte en surbrillance. Vous remplissez ensuite les autres informations (météo, lieu, date et heure) et vous envoyez les données pour qu'elles soient prises en compte [8].

En conclusion, une mobilisation générale est impérieuse pour maîtriser et faire décroître la pollution lumineuse du ciel.

La lumière pour décoder l'Univers au 21^e siècle

Au cours du dernier siècle, les avancées de l'astrophysique ont été extraordinaires. Notre connaissance de l'Univers en a été bouleversée. Les projets pour les décennies à venir sont fascinants, pour beaucoup liés au développement de nouveaux instruments au sol et dans l'espace, ainsi qu'aux nouvelles technologies associées. Pour la fin des années 2010 et les années 2020 la prochaine génération de grands instruments au sol sera l'*European Extremely Large Telescope* (E-ELT) développé par l'Observatoire Européen Austral (ESO) (voir l'article, p. 78), et dans l'espace le *James Webb Space Telescope* (JWST), qui est un instrument de la NASA en collaboration avec

l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ces instruments joueront, avec des performances bien meilleures, le même rôle que celui du *Very Large Telescope* (VLT) et du *Hubble Space Telescope* (HST) aujourd'hui. L'E-ELT restera sans aucun doute l'instrument d'observation ultime à partir du sol pendant longtemps.

Tous ces projets au sol nécessiteront un choix de site de plus en plus critique en fonction de la pollution lumineuse croissante sur l'ensemble de la Terre. Les objectifs affichés par la commission « Protection des sites d'observatoires existants et potentiels » sont de réaliser des progrès tangibles dans l'arrêt de l'intrusion de la lumière parasite dans les principaux sites de recherche astronomique, d'éveiller la conscience du grand public pour éviter les pertes causées par la pollution lumineuse de tous les observatoires, et de travailler avec les autorités nationales et internationales pour mettre en place un règlement et des guides pour la protection de la qualité astronomique des sites adaptés à la recherche en astrophysique ou qui méritent un statut astronomique particulier en tant qu'héritage mondial.

Espérons que les hommes resteront raisonnables, ne détruiront ni leur écosystème sous leurs pieds ni la beauté du ciel au-dessus de leur tête, et trouveront les moyens de réaliser les grands projets qui fourniront des réponses à leurs interrogations fondamentales sur l'Univers qui les entoure, encore si plein de mystères. ■

Références

1. www.darksky.org/assets/documents/ida-faune-French.pdf
2. www.afe-eclairage.fr/
3. L'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN) en France, et d'autres associations similaires hors de France, tentent d'agir en apportant leur soutien à l'amélioration de la qualité de la nuit et de l'environnement nocturne, que ce soit au niveau local en approchant les communes ou aux niveaux national et international en favorisant le vote de lois.
4. https://fr.wikipedia.org/wiki/Flash_Iridium
5. www.iau.org/submissions/newcommissions/detail/98/
6. <https://itunes.apple.com/us/app/dsm-iyl-2015/id626796278mt=8>
7. www.globeatnight.org/fr/webapp/
8. Plus de détails peuvent être trouvés sur le site de *Ciel & Espace* (www.cieletespace.fr/node/5915).