

Interview donnée à la revue *Espace & Astrophysique* et publiée en avril 2017.

D. Gialis, astrophysicien, répond aux questions de *Espace & Astrophysique*.

E&A : Où en sommes-nous de la recherche en astrophysique aujourd'hui ?

DG : Je dirais que l'on peut définir la recherche en astrophysique comme une recherche interdisciplinaire en expansion ! Pour reprendre une idée développée par Michel Serres dans un autre contexte, l'astrophysique est l'archétype d'une science *métissée*. Jusqu'à la Renaissance, on préférait parler uniquement d'astronomie : les philosophes, mathématiciens et astronomes grecs, babyloniens, égyptiens et chinois s'intéressaient principalement à l'étude de la position des astres qu'ils voyaient dans le ciel. Ils étaient ainsi capables de deviner, par exemple, les dates des prochaines éclipses de Soleil ou de Lune, la position des planètes les plus brillantes, et le ciel étoilé permettait d'établir des calendriers précis régissant la vie dans les différentes sociétés de leur époque. Leurs capacités prédictives étaient uniquement basées sur l'observation de la périodicité de nombreux phénomènes astronomiques observables à l'œil nu. Ils ne disposaient d'aucun cadre théorique leur permettant de comprendre et d'expliquer ce qu'ils voyaient dans le ciel et ils ne pouvaient, de ce fait, créer des liens entre les différentes observations. Par exemple, l'apparition d'une supernova ou d'une comète leur paraissait tout à fait extraordinaire, unique et donc incompréhensible, et l'on sait que l'incompréhension est très souvent source de peur ! Ainsi, de

nombreux souverains ont, au cours de l'histoire, interprété comme un mauvais présage l'observation d'un nouveau phénomène céleste...

Les différentes cosmogonies imaginées à travers les siècles, ont toutes des fondements philosophiques et/ou religieux, mais les tentatives pour expliquer l'Univers, son origine et son évolution ont toutes échouées au fur et à mesure que les observations astronomiques sont devenues de plus en plus précises et variées. La plus grande évolution dans la compréhension du monde qui nous entoure a eu lieu ces cinq cent dernières années : tandis que la vision d'une *sphère des fixes* (les étoiles) n'avait guère évolué depuis deux millénaires dans le monde occidental, les progrès de la science ont littéralement transformé notre façon de décrire le monde. Le développement des outils, comme l'invention de la lunette astronomique, et des concepts mathématiques, et l'application d'une démarche rigoureuse et objective en physique a permis l'émergence d'une astronomie ancrée dans le savoir scientifique : Copernic, Kepler, Galilée, Newton sont autant de grands noms de l'astronomie qui se sont appropriés les connaissances scientifiques de leur époque et les ont rigoureusement utilisées à des fins astronomiques. L'astronomie a alors acquis une nouvelle dimension : pour la première fois, le lien était fait entre ce que l'on pouvait toucher et observer sur notre planète et ce qui paraissait

inaccessible, lointain et indépendant dans le ciel. La méthode scientifique a permis d'anéantir la frontière entre ce qui semblait être deux mondes différents : celui de la Terre et des humains, et celui du Ciel et de ses éventuelles divinités. L'astrophysique est née de cette fusion conceptuelle entre le monde terrestre et le monde céleste : les lois mathématiques et les lois de la physique sont les mêmes ici-bas sur notre planète et aussi loin que l'on regarde dans l'espace. De façon imagée, on pourrait dire que l'astrophysique sort le scientifique de son laboratoire et l'entraîne à l'autre bout de l'Univers. Son caractère universel et la diversité des objets qu'elle est amenée à étudier font d'elle un carrefour de toutes les sciences : le physicien nucléaire pourra, par exemple, étudier le cœur des étoiles, le physicien des plasmas les vents stellaires, l'hydrodynamicien les disques d'accrétion ou les explosions de supernovæ, le chimiste le milieu interstellaire, le mathématicien la forme de l'Univers... Depuis la découverte de la première exoplanète, en 1995, l'exobiologie, une autre branche de l'astrophysique, a également connu un essor extraordinaire : la possibilité que la vie existe sur d'autres planètes est le moteur d'intenses recherches en biologie. Quelles sont les conditions d'apparition et de maintien de la vie sur une planète ? C'est une des questions fondamentales pour la science contemporaine.

L'astrophysique est donc sur tous les fronts, en ce sens que tout résultat scientifique est susceptible d'influencer la description que l'on fait de notre Univers ou, en tous cas, d'un objet astronomique. Elle favorise la collaboration interdisciplinaire ce qui

n'est pas chose facile, même (surtout !) chez les scientifiques !

La recherche en astrophysique connaît aujourd'hui un nouvel essor et ce, dans de nombreuses directions : la raison principale est l'investissement qui a été fait dans l'élaboration et la mise en service de nouveaux instruments au sol et dans l'espace. Le développement des techniques d'interférométrie, allié à celui de l'optique adaptative, a repoussé très loin les observations en optique et en infrarouge que l'on pouvait faire depuis le sol et qui, jusqu'alors, étaient très limitées par la turbulence atmosphérique. La haute résolution angulaire a permis de faire d'incroyables images de notre Univers et a ouvert la porte à la recherche d'exoplanètes. Tandis qu'il y a deux décennies, on avait beaucoup de difficultés à observer la surface de certaines planètes du Système Solaire, aujourd'hui, le but est de réaliser des images d'exoplanètes situées à plusieurs dizaines d'années-lumière : c'est un incroyable bond en avant technologique ! L'envoi d'instruments dans l'espace comme, par exemple, les télescopes spatiaux Hubble et Képler ou les satellites Planck et Fermi, a permis de sonder de différentes manières l'Univers en couvrant une bonne partie du spectre électromagnétique des ondes radio au rayonnement gamma, et en fournissant des données d'une précision jusque-là inégalée. Enfin, la révolution à laquelle on assiste aujourd'hui est celle des *nouveaux messagers de l'information* : depuis la naissance de l'astrophysique, les seules informations en provenance de l'Univers, que le scientifique avait à sa disposition, étaient celles contenues dans la lumière des objets que l'on

pouvait observer. Au début du siècle dernier, l'observation des rayons cosmiques tout comme la découverte théorique de particules comme les neutrinos ou bien des ondes gravitationnelles ont apporté les germes d'une formidable évolution dans la vision de notre Univers en nous montrant que les ondes électromagnétiques (ou photons) ne sont pas les seules à pouvoir traverser les distances gigantesques qui nous séparent des étoiles ou des galaxies. Aujourd'hui, c'est le fruit de ces découvertes que l'on est en train de cueillir : le développement des détecteurs de neutrinos commence à fournir des informations essentielles sur la physique des objets qui les ont produits et ce, de l'Univers primordial au cœur des étoiles. La détection très récente (fin 2015) d'ondes gravitationnelles donne également accès à des objets très difficilement observables comme des trous noirs ou des étoiles à neutrons dans des systèmes binaires. Au final, c'est bien une accélération dans la compréhension de notre Univers que connaît l'astrophysique d'aujourd'hui et ce n'est que le début !

E&A : Quels sont les enjeux de demain ?

DG : Les domaines de recherches sont riches et variés en astrophysique : les processus de formation planétaire comme, par exemple, les phénomènes de migration planétaire, ne sont pas encore suffisamment connus même si d'énormes progrès ont eu lieu ces vingt dernières années. La théorie de l'évolution stellaire n'est pas encore stabilisée et nécessite encore d'importantes simulations numériques pour tester les différents modèles conduisant à la diversité des étoiles que l'on observe. La naissance et

l'évolution des galaxies est également un sujet délicat impliquant de nombreuses équipes de recherche et qui fait le lien entre la physique stellaire et la cosmologie via, par exemple, le problème de la matière noire ou la formation des grandes structures (superamas de galaxies...). L'étude des phénomènes les plus violents (ceux qui libèrent le plus d'énergie) comme les supernovæ, les noyaux actifs de galaxies, les sursauts gamma, les magnétars, ... comporte encore de nombreuses zones d'ombre, des questions fondamentales pour la physique des hautes énergies, la physique des plasmas et plus généralement, la physique des particules. Tous ces objets ont pour caractéristique d'être composé d'un objet compact en leur centre, du type trou noir ou étoile à neutrons, en interaction gravitationnelle avec de la matière environnante : ils sont donc de formidables laboratoires naturels où peuvent se coupler des phénomènes relativistes et des phénomènes liés à la dynamique des plasmas. Enfin, l'étude des exoplanètes, qui n'est qu'à son début, ouvre la porte sur de nouveaux mondes planétaires qui sont autant de laboratoires naturels pour les scientifiques du futur, physiciens, chimistes et biologistes. Néanmoins, je crois que l'astrophysique de demain se doit de répondre aux deux questions fondamentales suivantes : celle de l'origine, de l'évolution et du destin de l'Univers dans lequel nous vivons, d'une part, et celle de l'origine de la vie sur Terre et de son éventuelle présence ailleurs dans l'Univers d'autre part. La réponse à la première question est le but de la cosmologie : elle est sous-tendue par la question fondamentale que tout être humain se pose lorsqu'il s'interroge sur l'origine de sa propre existence. C'est la raison

pour laquelle elle dépasse les cercles scientifiques et intéresse un très large public. La réponse à la seconde question est également très importante pour l'humanité : si la vie est quelque chose de banal dans l'Univers, cela constituerait en quelque sorte une seconde révolution copernicienne dans le sens où la Terre ne serait pas plus le centre de la vie, comme certains le pensent encore, que le centre de l'Univers...

E&A : Quelles furent les découvertes les plus incroyables depuis un an ?

DG : Depuis un an, la découverte en astrophysique qui a éclipsé toutes les autres est, sans conteste, celle des ondes gravitationnelles : leur existence théorique était prédites depuis un siècle par Albert Einstein, mais aucune observation directe n'avait été faite jusque là. C'est grâce à la mise en service des observatoires LIGO et VIRGO qu'à deux reprises, en quelques mois seulement, on a pu observer en direct la fusion de deux trous noirs en rotations l'un autour de l'autre. Le signal reçu n'était pas de la lumière mais des ondes gravitationnelles ! C'est une performance technologique et scientifique inégalée dans l'histoire de l'humanité, et cela fournit une preuve de plus quant à la validité de la théorie d'Einstein... Cela va permettre d'étudier des objets qui étaient très difficilement observables jusqu'à présent. Mais, ce qui est encore mieux, et avec l'amélioration constante des techniques, on pourra même observer l'Univers primordial dans sa phase la plus précoce, lorsqu'il était opaque à tout rayonnement électromagnétique, et voir les ondes gravitationnelles issues du Big Bang.

E&A : On parle souvent d'une remise en cause du modèle standard. Qu'en pensez-vous ?

DG : C'est un vaste problème qu'aucun scientifique ne peut réellement maîtriser étant donnée la complexité et la diversité des concepts mathématiques et physiques d'aujourd'hui ! Ce que l'on peut dire est que la cosmologie propose un modèle standard qui souffre de nombreuses questions non encore résolues. Évidemment, je pense à la question de la matière noire et surtout, de l'énergie noire de nature inconnue et qui représente environ 70% du contenu énergétique de l'Univers. Néanmoins, le modèle standard arrive à expliquer dans une théorie incomplète mais scientifiquement cohérente, une bonne partie des observations. Et s'il y a bien un domaine où la cosmologie progresse, c'est celui des données observationnelles : grâce à des satellites comme Planck, jamais les mesures sur le contenu de notre Univers n'avaient été aussi précises que celles dont on dispose aujourd'hui. Il est donc peu probable que le modèle standard soit complètement faux comme certains aiment le répéter sans apporter de solutions scientifiquement raisonnables. C'est même le meilleur modèle dont nous disposons actuellement. Il faut donc rester prudent et attendre certaines avancées de nos connaissances surtout en ce qui concerne la physique de l'infiniment petit : de notre connaissance de la physique des particules viendra la solution au problème cosmologique. Autrement dit, le modèle standard du futur ne pourra être que le fruit d'une collaboration étroite entre les physiciens de l'infiniment petit et ceux

de l'infiniment grand, et ce, avec des concepts qui nous dépassent encore.

E&A : Concernant la recherche de vie intelligente, où en sommes-nous ? Quel est votre avis ?

DG: Jusqu'au début des années quatre-vingt, la question même de l'existence éventuelle d'autres planètes en dehors du Système Solaire était presque taboue au sein de la communauté astrophysique : il y avait ceux qui trouvaient que cela était une évidence et qu'il fallait juste attendre une confirmation observationnelle, et ceux qui s'en tenaient à l'absence de preuve et qui trouvaient inutile et spéculatif l'évocation des exoplanètes. Bien sûr, cela changea à partir de 1995 avec la découverte de la première exoplanète par l'équipe de Michel Mayor et Didier Queloz de l'Observatoire de Genève. Les scientifiques tenaient tout à coup la preuve de l'existence d'autres planètes et l'on oublia vite les sceptiques. Mais les premières exoplanètes, observées dans les années 2000, via la méthode indirecte de transit, étaient toutes des planètes géantes comme Jupiter. Leurs caractéristiques physiques rendaient difficile l'idée qu'elles puissent abriter une quelconque forme de vie. Aussi, le débat sur l'existence d'exoplanètes s'est transformé en un débat portant sur l'existence de formes de vie extraterrestres. Mais, depuis quelques années et grâce au développement des méthodes de détections dites directes, on a découvert un certain nombre d'exoterras, c'est-à-dire des exoplanètes comparables en taille et en composition à la Terre. Encore mieux, pour la première fois, nous avons bientôt la possibilité d'obtenir directement des images de la surface de ces exoterras. Que va-t-on

découvrir ? Des océans et des continents recouverts de végétation semblables à ceux que l'on a sur Terre ? Il est permis, aujourd'hui, de tout imaginer. La vie demande des conditions physico-chimique assez particulières pour apparaître, même si l'on s'aperçoit de plus en plus de la diversité des milieux dans laquelle elle peut effectivement exister. Ce qui joue en faveur de la vie dans l'Univers est le nombre prodigieux de systèmes stellaires qui existent et donc de types de planètes. La présence de vie sur d'autres planètes me paraît donc être une évidence, mais attendons la confirmation observationnelle... Quant à la question d'une vie intelligente : il faudrait sans doute s'entendre sur l'adjectif « intelligent », et cela est loin d'être un débat clos ! Remarquons que quelle que soit la définition retenue pour l'intelligence, nous sommes incapables d'en définir les limites. D'ailleurs, l'humanité est-elle intelligente ?? Il est permis d'en douter ! Disons alors, de façon très (trop !) simplifiée, que l'intelligence d'une forme de vie pourrait s'interpréter globalement comme la capacité à modifier son environnement extérieur, à communiquer, à transmettre des connaissances au fil des générations, pour au final se libérer du lieu de son émergence et voyager dans l'Univers. L'humanité n'est apparue que dans les quelques derniers millions d'années, avec une explosion du progrès technologique en moins d'un siècle, tandis que l'évolution de la vie s'est déroulée sur plus de quatre milliards d'années ! Que de chemin parcouru avant de pouvoir communiquer avec des téléphones portables ou voyager en avion ! Ce schéma d'évolution, qui paraît extrêmement rare et difficile, est-il pour autant unique dans l'histoire de

l'Univers ? J'ai beaucoup de mal à y croire, mais c'est bien sûr une conviction personnelle et non un argument scientifique. Néanmoins, on peut constater que, jusqu'à présent, peu de programmes scientifiques dans le monde ont été dédiés à la recherche de vie intelligente et cela est bien dommage, car ce sujet, très sérieux, a souvent été officieusement ridiculisé dans les milieux scientifiques. La détection de milliers d'exoplanètes, et bientôt d'exoterras, relance cependant l'idée que l'humanité pourrait ne pas être la seule à étudier l'Univers. On ne peut alors que saluer l'extraordinaire vigueur, depuis les années soixante, du célèbre programme SETI (Search of Extra-Terrestrial Intelligence) dans la recherche de signaux électromagnétiques artificiels émis par une civilisation extra-terrestre. Mais mon sentiment est que cette recherche reste insuffisante. Notamment, on pourrait se poser la question suivante : pourquoi les signaux électromagnétiques seraient utilisés par des formes de vie intelligentes ? C'est encore un réflexe typiquement anthropocentrique de croire que, comme l'humanité, des extraterrestres utiliseraient principalement des photons pour communiquer. Les photons sont certes les particules les plus rapides que l'on connaisse, mais elles sont très facilement absorbées par tout ce qui se trouve sur leur trajectoire et, sur des distances interstellaires voire intergalactiques, il apparaît difficile d'imaginer que ce moyen soit réellement efficace et adapté. Par exemple, des neutrinos seraient beaucoup plus efficaces : ce sont des particules de masse quasi-nulle pouvant voyager quasiment à la même vitesse que les photons et qui sont extrêmement peu absorbées par la matière. Un signal de neutrinos

pourrait donc traverser de très grandes distances sans vraiment subir de pertes en intensité. Il ne resterait plus qu'à le détecter...

Mais le problème est encore plus profond. Que savons-nous des formes de communication que peuvent développer des êtres intelligents ? Sans connaître les limites ou les formes que peut prendre l'intelligence dans notre Univers, il nous est impossible de répondre à cette question. Que faire alors ? Comment s'affranchir des abîmes insondables qui semblent nous encercler ? Une des clefs, je crois, réside dans la connaissance de la nature intime de ce qu'est l'espace-temps. Notre expérience quotidienne de la vie nous montre des limites spatiales et temporelles très claires dans ce que l'on peut faire ou pas. Cependant, dans le monde des astres ou dans celui des particules, les règles sont moins évidentes à tel point que l'espace-temps imaginé par Einstein se révèle, par exemple, de nature très différente de celui de la physique quantique, alors que leurs succès à leurs échelles respectives sont indéniables depuis un siècle. Il existe même une échelle (10^{-33} cm), appelée échelle de Planck, au-dessous de laquelle la notion d'espace et de temps perd tout son sens, et la physique actuelle peine à décrire ce qui pourrait s'y passer. Pourtant, c'est bien la compréhension de cet infiniment petit qui pourrait nous donner la possibilité d'anéantir la barrière spatio-temporelle qui nous empêche d'explorer l'infiniment grand. Finalement, des êtres, dits intelligents, n'auraient-ils pas simplement la possibilité d'être exactement là où ils le souhaitent et quand ils le souhaitent en n'important quel point de l'Univers ?