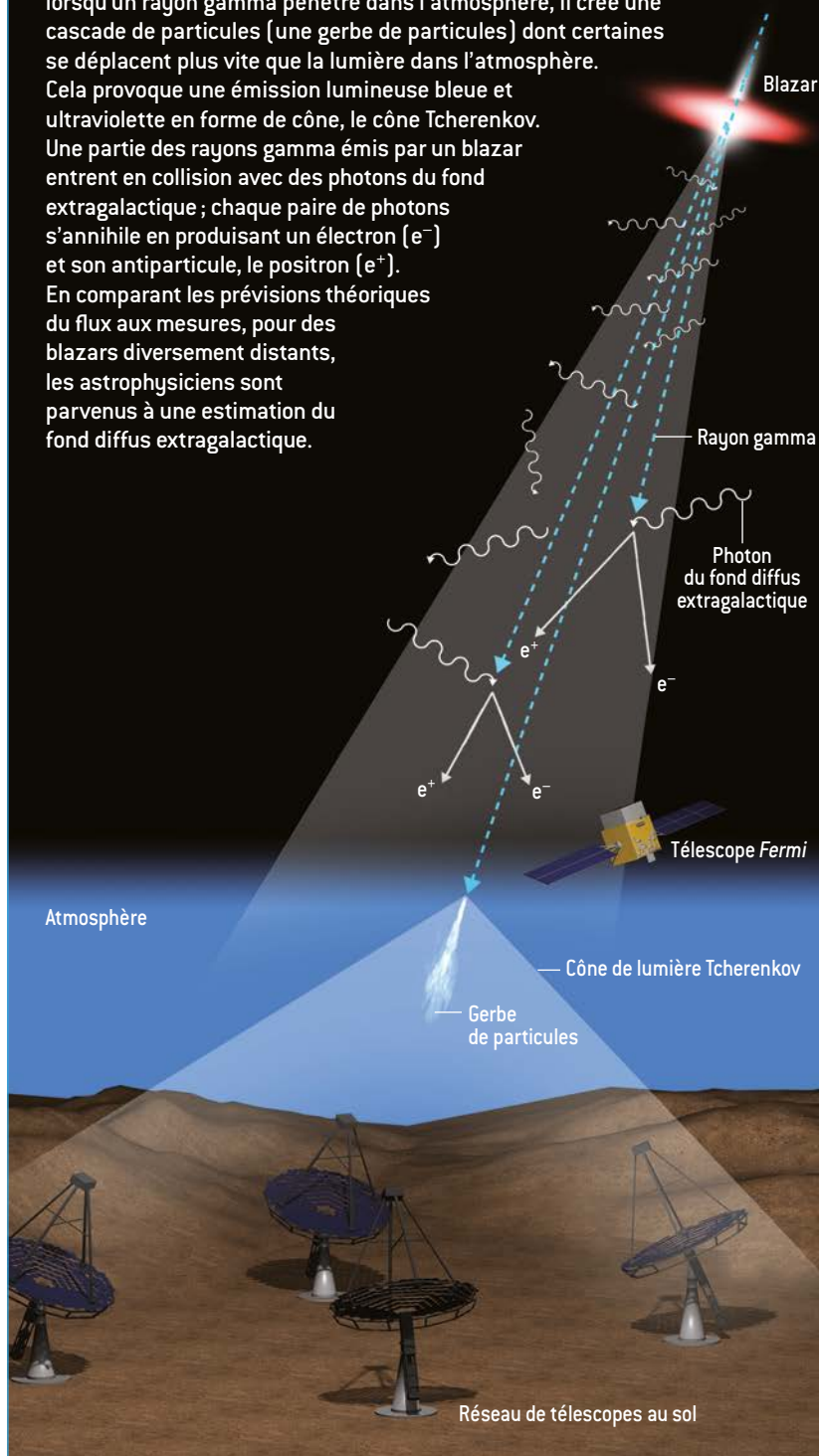


LE LONG VOYAGE DE LA LUMIÈRE

La lumière du fond extragalactique est difficile à détecter directement parce qu'elle est plus faible que la lumière de premier plan du Système solaire et de la Voie lactée. Les astrophysiciens ont utilisé une méthode indirecte en mesurant le flux de rayons gamma (*lignes pointillées*) émis par des objets lointains tels que les blazars (des galaxies avec des trous noirs supermassifs qui émettent ces rayons gamma). Ces rayons gamma sont mesurés grâce à des télescopes spatiaux, tel *Fermi*, ou au sol, tels les télescopes à imagerie Tcherenkov atmosphérique. Dans ce dernier cas, lorsqu'un rayon gamma pénètre dans l'atmosphère, il crée une cascade de particules (une gerbe de particules) dont certaines se déplacent plus vite que la lumière dans l'atmosphère. Cela provoque une émission lumineuse bleue et ultraviolette en forme de cône, le cône Tcherenkov. Une partie des rayons gamma émis par un blazar entrent en collision avec des photons du fond extragalactique ; chaque paire de photons s'annihile en produisant un électron (e^-) et son antiparticule, le positron (e^+). En comparant les prévisions théoriques du flux aux mesures, pour des blazars diversement distants, les astrophysiciens sont parvenus à une estimation du fond diffus extragalactique.



haute énergie entre en collision avec un photon peu énergétique, comme ceux de la lumière visible, ils s'annihilent en créant un électron et son antiparticule, le positron. Plusieurs astronomes ont commencé à se demander ce qui se passerait si des rayons gamma de haute énergie issus de sources cosmologiques lointaines et se dirigeant vers la Terre entraient en collision avec des photons de l'EBL, de plus basse énergie. La luminosité apparente des rayons gamma serait affaiblie, amputée de la part qui se serait annihilée avec les photons de l'EBL. Si les scientifiques parvenaient à détecter une telle atténuation des rayons gamma, la composition du fond diffus extragalactique pourrait se révéler.

Des phares galactiques

Cette question est restée théorique jusqu'en 1992, quand le détecteur EGRET (*energetic gamma ray experiment telescope*), sensible aux rayons gamma et embarqué sur l'observatoire spatial *Compton* de la Nasa, découvrit le premier objet d'une nouvelle classe de sources de rayons gamma qui allaient prendre le nom de blazars : des galaxies dotées d'un trou noir central supermassif qui émettent de puissants jets de rayons gamma qui, par chance, sont dirigés vers la Terre. Les rayons gamma de ces jets ont une énergie phénoménale de plusieurs milliards d'électronvolts (ou gigaélectronvolts). Certains blazars, tels que Markarian 421 (Mrk 421 en raccourci) émettent des rayons gamma d'énergie stupéfiante, atteignant 20 téraélectronvolts (milliers de gigaélectronvolts), soit des rayons environ 100 millions de fois plus énergétiques que les rayons X à usage médical.

Distant de quelque 400 millions d'années-lumière, le blazar Mrk 421 est relativement proche à l'échelle extragalactique. Mais sa découverte dans les années 1990 amena Joel Primack à se demander s'il existait des blazars beaucoup plus lointains et émettant des rayons gamma d'énergie comparable, qui seraient utiles pour détecter l'EBL. De fait, dans les années suivantes, de tels objets ont été découverts à des distances de plus en plus grandes.

À partir de 2006, Alberto Domínguez a alors cherché un moyen d'exploiter les blazars pour mesurer l'EBL, alors qu'il étudiait ces objets au moyen de l'observatoire de rayons gamma MAGIC. En 2012, il a signé, avec une équipe de cent cinquante personnes

W. Steffen, université autonome de Mexico ; source : N. McCurdy et J. Primack, université de Californie, Centre de computation pour l'astronomie

sous la direction de Marco Ajello, maintenant à l'université de Clemson aux États-Unis, une étude qui présente la première mesure de la quantité de lumière issue d'un blazar, absorbée par l'EBL. Les chercheurs ont étudié les données du télescope spatial *Fermi*, en analysant les observations de cent cinquante blazars à des distances variées afin de mesurer dans quelles proportions leurs rayons gamma sont atténués en fonction de la distance, c'est-à-dire après avoir traversé différentes épaisseurs de l'EBL. Les observations s'étendent jusqu'à un décalage vers le rouge de 1,6, ce qui correspond à la lumière émise il y a presque 10 milliards d'années.

Pour affiner cette mesure, les astronomes ont besoin de mieux comprendre les blazars, et donc de savoir quelle quantité de rayons gamma de diverses énergies un blazar a produit avant que certains ne soient absorbés par des collisions avec les photons de l'EBL en traversant les milliards d'années-lumière d'espace extragalactique.

La meilleure façon d'estimer l'émission d'un blazar est de combiner les modèles théoriques d'un tel objet (qui décrivent, en particulier, comment il produit des rayons gamma très énergétiques) avec les observations de blazars dans les domaines des rayons gamma de basse énergie et des rayons X, qui ne sont pas absorbés par le fond EBL aussi souvent.

On pense que, pour de nombreux blazars, les rayons gamma de haute énergie résultent d'un processus nommé diffusion synchrotron Compton auto-induite (ou diffusion SSC, pour l'anglais *synchrotron self-Compton scattering*). Dans le jet du blazar, un faisceau énergétique d'électrons et de positrons interagirait avec des champs magnétiques et émettrait des rayons X. Certains de ces rayons X interagiraient à leur tour avec les électrons du jet (diffusion par effet Compton), et l'énergie transmise par ces derniers transformerait les rayons X en rayons gamma. Les modèles SSC permettent ainsi de prédire l'intensité de l'émission des rayons gamma de haute énergie en utilisant les observations relatives aux rayons gamma de basse énergie.

En 2013, Alberto Domínguez, Joel Primack, Justin Finke, du Laboratoire de recherche de la marine des États-Unis,

Les astrophysiciens étudient la formation des galaxies et des étoiles à partir du fond diffus extragalactique

Francisco Prada, de l'Institut d'astrophysique d'Andalousie, et trois autres collègues ont réuni les données de quinze blazars situés à différentes distances cosmologiques, données recueillies par une demi-douzaine de sondes de la Nasa et plusieurs télescopes au sol sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde. Ils ont comparé les résultats du télescope spatial à rayons gamma

Fermi avec l'intensité des rayons X des mêmes blazars mesurés par les satellites *Chandra X-ray Observatory*, *Swift*, *Ross X-ray Timing Explorer* et *XMM-Newton*, en complétant avec des mesures des observatoires au sol dans les domaines optique et radio.

À l'aide de ces données et des modèles SSC du flux sortant des blazars, ils ont calculé la luminosité originale, non atténuée, en rayons gamma émis aux plus grandes énergies par neuf des blazars. Ils ont alors comparé ces calculs aux mesures directes, par des télescopes au sol, de la lumière gamma atténuée effectivement reçue à la surface de la Terre en provenance de ces mêmes blazars. Ils ont ainsi estimé l'empreinte de l'EBL sur les rayons gamma des blazars.

Une nouvelle fenêtre s'ouvre sur le cosmos

La détection de l'EBL était un grand défi pour l'astronomie observationnelle : percevoir un signal si faible et diffus a nécessité de coordonner des télescopes et des chercheurs dans le monde entier pour réaliser des observations simultanées d'objets extrêmement lointains. Elle a offert l'occasion d'étudier l'histoire cosmique sous un angle inédit.

Tandis que, dans les années 1990, les astronomes se rendaient compte que les blazars pourraient servir à étudier l'EBL, Joel Primack et Donn MacMinn (alors étudiant à l'université de Californie à Santa Cruz) ont commencé à s'interroger sur la façon d'exploiter ces observations pour mieux comprendre l'évolution des galaxies. En effet, beaucoup de questions fondamentales restent en suspens : quelle est la prévalence des étoiles massives dans les galaxies à diverses étapes de leur développement, comment la poussière absorbe et réémet de l'énergie aux longueurs d'onde les plus grandes, ou encore comment le rythme de

LES AUTEURS



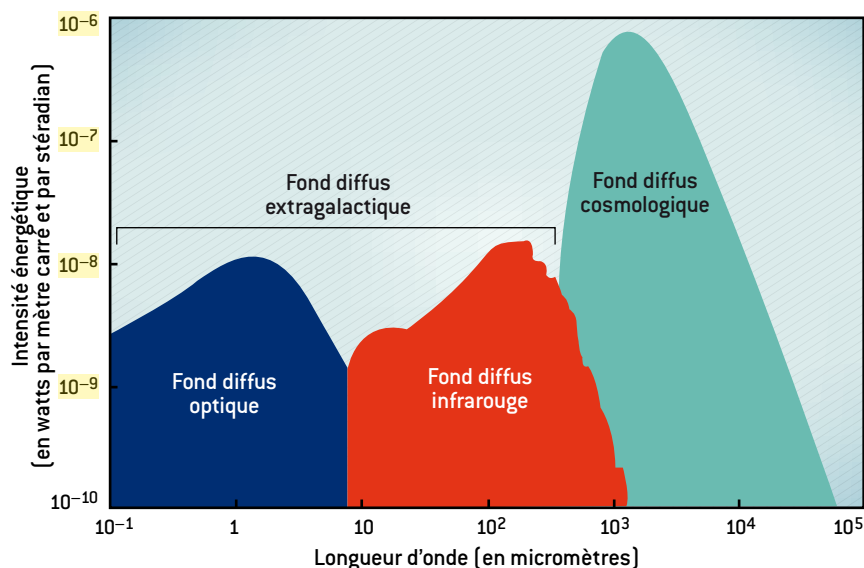
Alberto DOMÍNGUEZ est postdoctorant au département de physique et d'astronomie de l'université de Clemson, en Caroline du Sud, aux États-Unis.



Joel PRIMACK est professeur émérite de physique à l'université de Californie, à Santa Cruz, aux États-Unis.



Trudy BELL, écrivaine et journaliste, a travaillé pour le magazine *Scientific American*.



LE RAYONNEMENT QUI EMPLIT L'UNIVERS a diverses origines. Le plus important, le fond diffus cosmologique, a été émis 380 000 ans après le Big Bang. Le fond diffus extragalactique a deux composantes : une partie dans le domaine optique, émise directement par les étoiles, et une partie infrarouge, émise par la poussière interstellaire chauffée par des étoiles.

formation des étoiles dans les galaxies a varié au fil des époques de l'Univers, etc.

Les rayons gamma émis par les blazars traversent différentes épaisseurs de l'EBL, selon leur distance. Ils portent une certaine information sur le fond diffus extragalactique, qui aiderait à répondre à certaines de ces questions fondamentales en ouvrant des fenêtres sur différentes époques de formation stellaire.

Par exemple, nous savons que les galaxies lointaines de l'Univers primordial ont une physionomie bien différente de celle des galaxies proches : au lieu d'être des sphéroides réguliers ou de magnifiques spirales, elles sont compactes et difformes. Leurs formes distordues résultent en partie des collisions entre ces galaxies anciennes, fréquentes parce que l'Univers était plus dense dans sa jeunesse que maintenant. Les galaxies anciennes émettent également beaucoup plus de lumière infrarouge, en proportion, que les galaxies proches. Cela signifie que la lumière de l'EBL due aux galaxies anciennes très éloignées a un spectre différent de celui de la lumière EBL émise par des galaxies récentes et proches.

Les chercheurs examinent donc la répartition en énergie (le spectre) des rayons gamma absorbés par les photons de l'EBL. Le spectre des rayons gamma absorbés très loin dans l'espace (c'est-à-dire aussi très loin dans le temps) devrait être différent du spectre de ceux absorbés par les photons de l'EBL, plus proches. Dès 1994, Donn

MacMinn et Joel Primack ont modélisé la forme théorique de ces spectres. Ils en ont conclu que le facteur le plus important pour définir les caractéristiques de l'EBL est l'époque de formation galactique à laquelle les photons ont été émis. Sur la base de différentes hypothèses cosmologiques, ils ont déduit l'évolution au fil du temps de l'atténuation des rayons gamma par le fond diffus extragalactique. Ainsi, selon les mesures d'absorption des rayons gamma de sources diversement distantes, il sera possible de tester les théories concurrentes qui décrivent l'évolution des galaxies.

Avec les premières mesures du fond diffus extragalactique obtenues à partir de l'atténuation des blazars, les chercheurs ont commencé à brosser un tableau de la formation stellaire et galactique à travers l'histoire cosmique. Par exemple, le spectre de longueurs d'onde des mesures de l'EBL donne un aperçu de ce qui se passait au pic de formation stellaire, il y a 8 à 12 milliards d'années. Ce spectre présente deux bosses : l'une représente la lumière ultraviolette et visible issue d'étoiles, et l'autre correspond à la lumière infrarouge (voir la figure ci-contre).

Des indices de présence de la poussière

Cette seconde bosse semble être produite par de la poussière. Nous savons que les étoiles qui explosent produisent de la poussière (constituée d'éléments lourds tels que carbone, oxygène et fer), qui enveloppe et obscurcit les régions de formation stellaire. Au pic de formation des étoiles, la poussière absorbait une bonne partie de la lumière stellaire et la réémettait dans l'infrarouge. L'EBL fournit un moyen d'étudier la prévalence de ces galaxies obscurcies par la poussière à cette époque : c'est un élément important pour comprendre comment les planètes rocheuses telles que la Terre se sont formées, ces planètes contenant une grande quantité de poussière cosmique.

Ces résultats concrétisent plus de vingt années de recherche. Partis de l'idée qu'il était possible de « voir » la lumière émise par toutes les étoiles, actuelles ou passées, de l'Univers, nous avons aujourd'hui un outil pour étudier l'évolution de l'Univers au travers des caractéristiques du fond diffus extragalactique.

Jusqu'où pourrions-nous remonter dans le temps grâce aux recherches sur l'EBL ?

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Domínguez et al., *Detection of the cosmic gamma-ray horizon from multiwavelength observations of blazars*, *Astrophysical Journal*, vol. 770(1), 77, 2013.

Collaboration Fermi, *The imprint of the extragalactic background light in the gamma-ray spectra of blazars*, *Science*, vol. 338, pp. 1190-1192, 2012.

H. Dole et al., *Le fond infrarouge de galaxies livre ses secrets*, 2008.
http://www.CNRS.fr/publications/imagesdelaphysique/Auteurs2008/05_DLP.htm

G. Hasinger et R. Gilli, *Le grand inventaire cosmique*, *Pour la Science*, n° 297, juillet 2002.