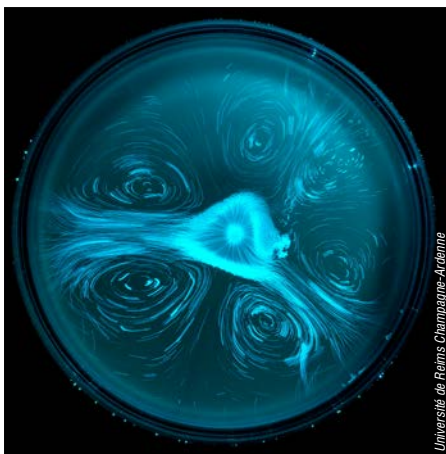




LES TOURBILLONS QUI AGITENT LA SURFACE d'un verre de champagne [voir aussi l'illustration page 37] évoquent par leur aspect les systèmes tourbillonnaires des courants océaniques, reconstitués ici à l'aide de données satellitaires. Plus spécifiquement, à la surface du champagne, les tourbillons s'organisent en un nombre pair de cellules régulièrement disposées autour de l'axe central.

bien connu des physiciens : la tomographie laser. Cette technique consiste à éclairer le fluide avec un plan de lumière laser ; des particules ajoutées au fluide diffusent cette lumière et permettent ainsi de visualiser les mouvements du fluide dans ce plan.

Des tourbillons comme dans les océans

Ces mouvements tourbillonnaires ont une importance considérable dans le champagne. Ils renouvellent en permanence la surface libre du liquide en composés volatils odoriférants, accélérant ainsi l'évaporation des arômes du vin. Ils sont donc responsables d'une perception plus efficace des arômes que le vin recèle.

Notons d'ailleurs que l'olfaction d'un vin tranquille (incapable de tourbillonner par lui-même) s'effectue toujours après l'avoir agité. En imprimant un mouvement de rotation à son verre, le dégustateur met le vin en rotation, permettant ainsi aux arômes de s'échapper plus rapidement. Dans le cas du champagne, cette agitation est inutile. L'effervescence joue ce rôle à merveille en faisant tourbillonner le champagne dans un verre au repos !

Prenons encore un peu de recul et embarquons à bord d'un satellite de la Nasa. Entre juin 2005 et décembre 2007,

dans le cadre du programme ECCO (*Estimating the Circulation and Climate of the Ocean*), la Nasa a synthétisé l'ensemble des données satellitaires portant sur la circulation océanique de surface. Le but ultime est de modéliser, à l'échelle planétaire, les mouvements des masses d'eau afin de les prendre en compte dans les modèles destinés à mieux cerner les futurs changements climatiques. Au-delà de l'avancée scientifique majeure que constitue ce programme pour la compréhension du fonctionnement de notre planète, le résultat visuel est éblouissant. Les images qui matérialisent les courants à la surface des océans sont d'une grande beauté graphique (voir la figure ci-dessus).

À l'échelle des océans, on retrouve des systèmes tourbillonnaires qui rappellent ceux qui agitent la surface du champagne. À la toute petite échelle d'une flûte de champagne, le fluide est mis en mouvement par la remontée des bulles et s'organise spontanément en de multiples cellules convectives, tout comme le font les courants océaniques à la surface du globe. Le microcosme de la flûte de champagne rejoint ainsi le macrocosme de la surface océanique ! L'infiniment petit de la flûte de champagne est une leçon sur l'infiniment grand qui nous entoure et dans lequel l'homme se retrouve plongé... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et G. Polidori, **Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne**, Odile Jacob, 2015.

G. Liger-Belair et al., **Champagne - La vie secrète des bulles**, Le Cherche midi, 2015.

F. Beaumont et al., **Numerical modelling of bubble-driven flow patterns in champagne glasses**, *Int. J. of Num. Meth. for Heat and Fluid Flow*, vol. 24, pp. 563-578, 2014.

G. Liger-Belair et al., **Champagne cork popping revisited through high-speed infrared imaging: The role of temperature**, *Journal of Food Engineering*, vol. 116, pp. 78-85, 2013.

Détecter la lumière de toutes les étoiles disparues

Plusieurs générations d'étoiles, aujourd'hui éteintes,
ont empli l'Univers d'un rayonnement ambiant
que les astronomes commencent tout juste à détecter.

Alberto Domínguez, Joel Primack et Trudy Bell



Pourquoi le ciel nocturne est-il si obscur ? Après tout, si l'Univers est rempli de milliards de galaxies, constituées chacune de milliards d'étoiles qui émettent des photons depuis des milliards d'années, comment expliquer que l'Univers ne soit pas inondé de lumière ? L'astronome allemand Wilhelm Olbers se posait la question dans les années 1820, et cette énigme porte désormais le nom de « paradoxe d'Olbers ». En fait, cela faisait des siècles que les astronomes et les philosophes se demandaient pourquoi le ciel était si sombre, et ce que cette obscurité signifiait concernant la nature de l'Univers. Ces savants avaient mis le doigt sur une question bien plus profonde qu'ils ne l'imaginaient.

Le cosmos renferme bien plus de lumière que ce que nous pouvons voir. Même dans les profondeurs de l'espace, loin des lumières de la Terre et des étoiles de la Voie lactée, le milieu intergalactique n'est pas complètement noir. Il brille faiblement d'une lueur nommée fond diffus extragalactique (EBL pour *extragalactic background light*). Ce rayonnement comprend toute la lumière, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge, émise par l'ensemble des étoiles et des galaxies ayant jamais existé pendant l'histoire cosmique, de son commencement jusqu'à nos jours.

Ce fond diffus extragalactique est faible, car l'espace extragalactique est vaste comparé au nombre de galaxies qui y brillent (ou y ont brillé un jour). Et parce que l'Univers est en expansion, les photons émis par les galaxies se sont répartis dans un volume toujours plus immense et s'y sont dilués. En outre, cette expansion entraîne un décalage vers le rouge de la lumière des galaxies lointaines : la longueur d'onde de cette lumière a augmenté, c'est-à-dire que la lumière visible de ces galaxies est devenue de plus en plus rouge, puis a versé dans l'infrarouge, en dehors de la plage visible.

Les astronomes ont compris, depuis 1967, que ce fond de lumière extragalactique devait exister, et a été découvert par une équipe française en 1996 dans les données du satellite COBE, dans l'infrarouge lointain. La même équipe, à Orsay, a mesuré ce fond en 2006 avec le satellite *Spitzer* avec précision. Ces mesures montraient que l'EBL est principalement composé de lumière provenant de galaxies formant beaucoup d'étoiles masquées par de la poussière qui rayonne dans l'infrarouge lointain.

En revanche, l'EBL dans le domaine visible et proche infrarouge, émis directement

par les étoiles, était beaucoup plus difficile à mesurer. Des premières mesures utilisant des blazars provenant des télescopes HESS datent de 2005 et 2007. Entre 2012 et 2013, des chercheurs (dont deux d'entre nous, Alberto Domínguez et Joel Primack) sont parvenus à quantifier sans ambiguïté le fond extragalactique en utilisant des données portant sur les rayons gamma, enregistrées par le télescope spatial *Fermi* et par des détecteurs au sol – des télescopes à imagerie Tcherenkov atmosphérique.

En plus du défi technique, ce rayonnement intéresse beaucoup les astrophysiciens parce qu'il préserve d'une certaine façon la « mémoire » de la formation stellaire aux différentes époques de l'histoire de l'Univers. En effet, les étoiles contribuent à l'essentiel du fond extragalactique, soit en émettant directement de la lumière, soit en chauffant la poussière du milieu interstellaire, qui rayonne alors à des longueurs d'onde plus grandes. Et de fait, les mesures du fond diffus extragalactique permettent d'explorer l'évolution des galaxies depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. À terme, nous espérons étudier la toute première génération de galaxies, formée il y a plus de 13 milliards d'années, dont la lumière est trop faible pour être vue directement avec les télescopes actuels.

L'ESSENTIEL

- Le ciel nocturne est sombre. Pourtant, il est rempli de la lumière accumulée de toutes les étoiles qui ont brillé au cours de l'histoire de l'Univers.
- Ce fond diffus extragalactique est peu lumineux comparé aux objets proches et au fond diffus cosmologique.
- Les astronomes ont mis au point une méthode pour détecter cette lumière en étudiant le rayonnement de galaxies lointaines nommées « blazars ».
- Les chercheurs en extraient des indices sur l'évolution des galaxies, des plus anciennes aux plus récentes.

Fond cosmologique et fond extragalactique

Le paradoxe d'Olbers a été surtout une question philosophique jusque dans les années 1960. Grâce aux progrès techniques et à l'accumulation des découvertes astronomiques, la cosmologie a évolué du statut d'idées spéculatives à celui de science observationnelle rigoureuse. La vision de l'Univers s'est précisée et, en particulier, l'idée que l'espace était rempli d'un « gaz » dilué de photons filant à toute vitesse et en tous sens a germé. Ces photons devaient avoir des longueurs d'onde très variées, des informations intéressantes pour comprendre le cosmos. Il fallait concevoir des instruments pour mesurer des photons de différentes énergies. L'énergie d'un photon est liée à sa longueur d'onde : une longueur d'onde courte correspond à une onde de haute fréquence et donc de grande énergie ; inversement, une grande longueur d'onde est associée à une fréquence basse et une énergie faible.

Ce gaz de photons inclut le fond diffus extragalactique ainsi que d'autres types de

rayonnement observables dans toutes les directions du ciel. Le plus brillant est le fond diffus cosmologique (qui se situe dans la gamme des micro-ondes). Il a été émis très tôt dans l'histoire de l'Univers, 380 000 ans après le Big Bang, et il fut observé pour la première fois en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson alors qu'ils travaillaient aux laboratoires AT&T Bell. Ils reçurent le prix Nobel de physique en 1978 pour cette découverte. Dans les années 1960, les chercheurs découvrent un fond diffus de rayons X extragalactiques au moyen de fusées-sondes, puis un fond diffus de rayons gamma grâce à un observatoire spatial.

Une lumière trop discrète

Le fond diffus extragalactique (qui recouvre les longueurs d'onde du proche ultraviolet, du visible et de l'infrarouge) est deuxième en termes d'énergie et d'intensité derrière les micro-ondes du fond diffus cosmologique. Mais contrairement au fond diffus cosmologique, l'EBL n'a pas été produit d'un seul coup ; il augmente continuellement depuis des milliards d'années, depuis la formation des premières étoiles dans les premières galaxies,

soit environ 200 millions d'années après le Big Bang. L'EBL reçoit encore aujourd'hui de nouvelles contributions, puisque sans cesse de nouvelles étoiles naissent et se mettent à briller (*voir l'encadré ci-dessous*).

Si le fond diffus extragalactique est alimenté en permanence, il n'en reste pas moins difficile à observer. Le mesurer directement en recueillant ses photons avec un télescope reviendrait à essayer d'observer la Voie lactée en se plaçant au milieu de la place du Trocadéro, à Paris, avec tout l'éclairage public et la pollution lumineuse engendrée. La Terre se trouve à l'intérieur d'une galaxie très lumineuse renfermant des milliards d'étoiles et d'immenses nuages de gaz rougeoyant qui éclipsent le fond diffus extragalactique. Pire encore, au sein du Système solaire, la lumière du Soleil est diffusée par toute la poussière environnante. Cela constitue la lumière dite zodiacale, que l'on peut confondre avec l'aube à certaines périodes de l'année dans des sites épargnés par la pollution lumineuse. En outre, la lumière zodiacale brille dans les mêmes longueurs d'onde que l'EBL.

Comment les astronomes pouvaient-ils espérer un jour isoler, capter et identifier des photons du pâle EBL dans ces conditions ?

En fait, ils ne le peuvent pas. Les télescopes, dans l'espace comme au sol, ont échoué à mesurer directement et correctement l'EBL. En 2000, Piero Madau, de l'université de Californie à Santa Cruz, et Lucia Pozzetti, de l'observatoire astronomique de Bologne, ont proposé une façon indirecte d'en estimer l'intensité. Ils ont additionné la lumière des galaxies détectées par le télescope spatial *Hubble*. Cela incluait les galaxies brillantes et certaines galaxies pâles, invisibles pour les autres télescopes, mais omettait le reste de l'EBL (qui correspond à toute la lumière émise, des longueurs d'onde du proche ultraviolet à celles de l'infrarouge). Avec ce recensement, les chercheurs pouvaient donner une limite basse de l'intensité du fond EBL aux différentes longueurs d'onde.

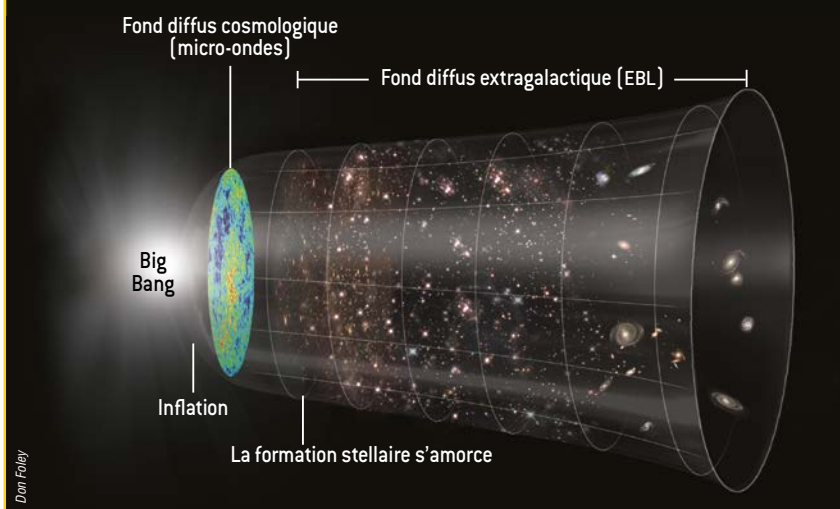
En 2011, Alberto Domínguez, Joel Primack et leurs collaborateurs ont amélioré ces limites en additionnant la quantité de lumière infrarouge et visible, observée par des télescopes au sol et dans l'espace, émise par les galaxies allant des plus proches à celles distantes de 8 milliards d'années-lumière (distance correspondant à un doublement de la longueur d'onde initiale de la lumière émise, soit un décalage vers le rouge égal à 1, dans les unités utilisées par les astrophysiciens).

Regarder très loin dans l'espace revient à regarder très loin dans le passé, puisque nous voyons les objets tels qu'ils étaient quand la lumière a été émise. Une distance de 8 milliards d'années-lumière correspond ainsi à un peu plus de la moitié de l'histoire de l'Univers (âgé de 13,8 milliards d'années). Les chercheurs ont mesuré les spectres de rayonnement – la répartition en longueurs d'onde – des galaxies situées à différentes distances, c'est-à-dire appartenant à différentes époques cosmiques. En les comparant, on évalue les variations du taux de formation d'étoiles dans les galaxies au cours de l'histoire de l'Univers, ce qui influe sur le fond diffus extragalactique. Le rayonnement provenant de galaxies plus anciennes a été estimé. Cette méthode a permis la meilleure détermination en date, à partir d'observations, du fond diffus extragalactique. Mais pour véritablement mesurer l'intensité lumineuse du fond extragalactique, les astronomes allaient devoir changer d'approche.

Dès les années 1960, les chercheurs ont envisagé de traquer l'EBL par l'intermédiaire de ses interactions avec d'autres formes de lumière plus faciles à détecter. Par exemple, quand un photon gamma de

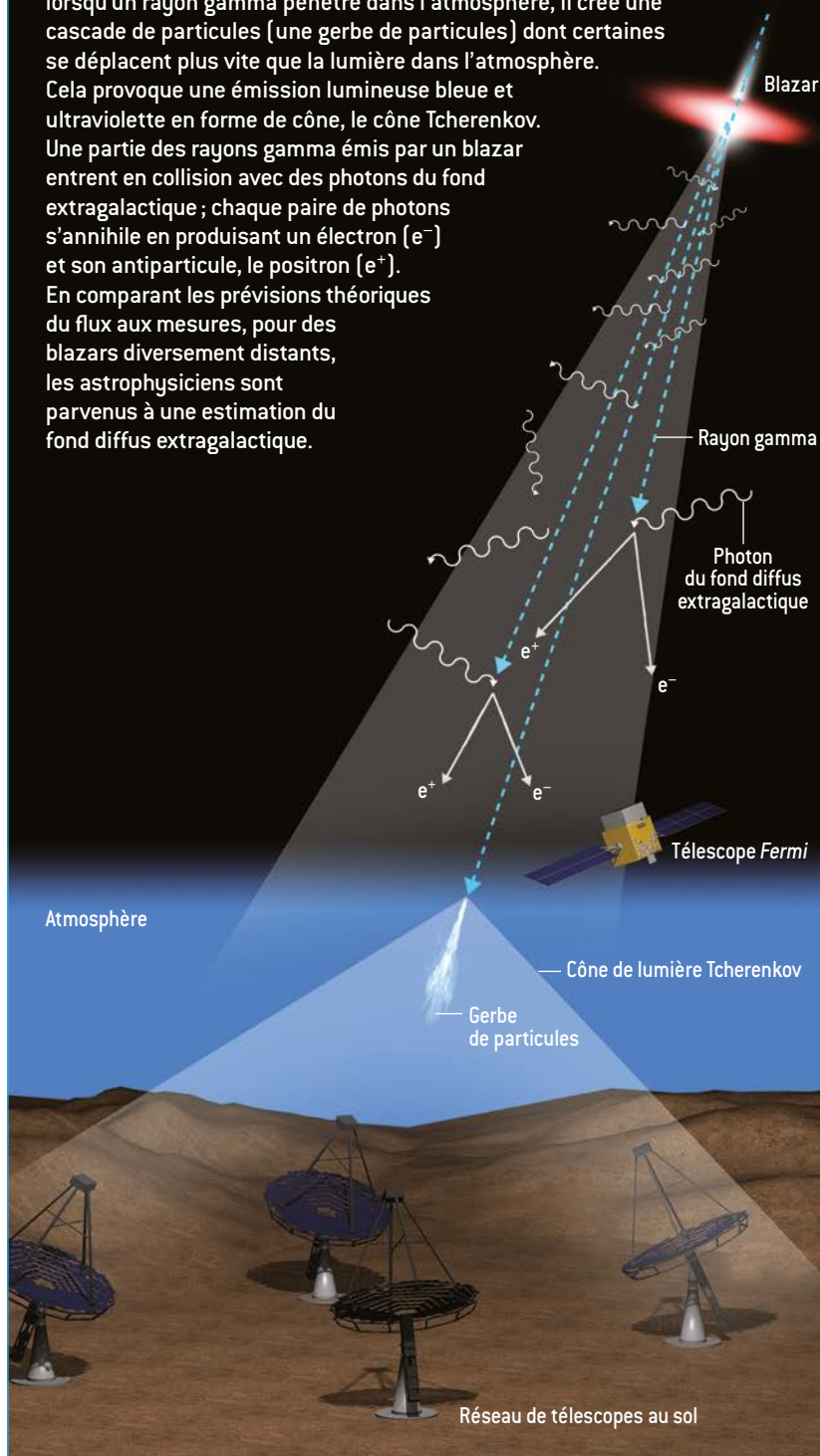
LE FOND DIFFUS EXTRAGALACTIQUE

Le fond diffus extragalactique (EBL) est constitué de la lumière de toutes les étoiles ayant jamais brillé. Ce rayonnement a commencé à s'accumuler à partir du moment où les premières étoiles se sont formées, environ 200 millions d'années après le Big Bang. De nouveaux astres y ajoutent en permanence leur contribution. Mais, parce que l'espace est si vaste (et parce qu'il est en expansion), cette lumière est faible et diffuse. Le fond diffus cosmologique (micro-ondes) est un autre rayonnement qui imprègne tout l'Univers. Contrairement à l'EBL, le fond diffus cosmologique ne croît pas avec le temps ; il a été émis une fois pour toutes environ 380 000 ans après le Big Bang.



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



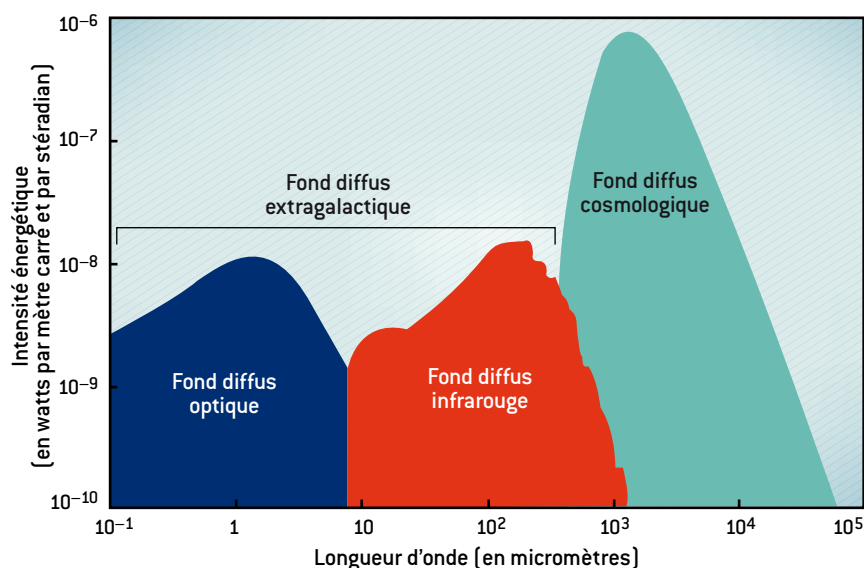
Alberto DOMÍNGUEZ est postdoctorant au département de physique et d'astronomie de l'université de Clemson, en Caroline du Sud, aux États-Unis.



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.

De futurs travaux pourraient nous apporter des informations sur des périodes encore plus anciennes de l'histoire de l'Univers. Si nous parvenons à étendre nos observations de l'EBL jusqu'à inclure quelques sources de rayons gamma à plus grand décalage vers le rouge, les astronomes pourraient étudier comment l'Univers a été réionisé au cours du premier milliard d'années après le Big Bang, la lumière ultraviolette des premières étoiles ayant ionisé les atomes neutres de la matière qui composait l'Univers en leur arrachant des électrons. Cet objectif est l'une des principales motivations du prochain télescope international CTA (*Cherenkov telescope array*, « réseau de télescopes Tcherenkov ») en cours de conception, avec des installations dans les hémisphères Nord et Sud, qui seront constitués de différents instruments conçus pour être sensibles aux rayons gamma, des plus basses énergies aux plus hautes.

Par ailleurs, une fois que nous comprendrons et quantifierons mieux l'EBL, nous pourrions soustraire son atténuation des observations de blazars et de sursauts gamma afin de décrire plus

complètement la nature de ces objets exotiques eux-mêmes.

En attendant, l'intensité de l'EBL mesurée indirectement par notre technique d'atténuation des rayons gamma est globalement compatible avec l'intensité de l'EBL estimée indépendamment à partir d'observations de galaxies d'époques plus anciennes. Cet accord signifie que la lumière émise par les galaxies aux longueurs d'onde des domaines optique et proche infrarouge semble expliquer les observations de l'EBL par l'intermédiaire de l'atténuation des rayons gamma. Un tel résultat nous conforte dans notre compréhension du fond diffus extragalactique et sur les conclusions que nous en tirons sur l'évolution des galaxies.

Regarder vers l'avenir

À mesure que nous affinerons nos mesures, l'accord entre les observations directes des galaxies et indirectes à partir des blazars pourrait être renforcé ou, au contraire, montrer des anomalies. Dans un cas, nous pourrions alors fixer des limites sur la présence dans l'Univers de sources de

lumière, telle la désintégration d'hypothétiques particules qui se seraient formées dans l'Univers primordial, et dans l'autre cas mettre en évidence de nouveaux phénomènes astrophysiques tels que la désintégration de particules exotiques se convertissant en rayons gamma. Les observations des rayons gamma seront grandement améliorées par la mise en service de CTA, mais c'est toute une nouvelle génération de télescopes spatiaux (le télescope *James Webb*), de télescopes au sol de plus de 30 mètres de diamètre, ainsi que le programme LSST (*Large synoptic survey telescope*) qui permettront de mieux comprendre la formation des galaxies.

Nous connaissons maintenant la réponse au paradoxe d'Olbers: le ciel nocturne n'est pas sombre; il est rempli de la lueur de toutes les galaxies qui ont existé depuis le commencement de l'Univers, même si cette lueur est difficile à détecter. Et en permanence, des supernovæ explosent, des nuages de gaz luisent et de nouvelles étoiles naissent, ajoutant leur lumière à ce fond omniprésent qui emplit chaque centimètre cube du cosmos. ■

En Janvier Cerveau & Psycho devient mensuel

11 numéros
par an
au lieu de 6

Toujours au cœur de la révolution cognitive
le nouveau Cerveau & Psycho

+ complet + attractif + rythmé

Et vous retrouverez toujours vos chroniqueurs préférés
Christophe André, Serge Tisseron, Sébastien Dieguez

www.cerveauetpsycho.fr

S'adapter à la

CYBER

Keren Elazari

Chaque appareil connecté est une cible potentielle pour les cybercriminels. Les gouvernements ne pourront sécuriser le cyberspace que si les particuliers sécurisent leurs propres équipements.

En termes de cybersécurité, aiment à dire les spécialistes, il existe deux types d'organisations : celles qui ont été touchées et celles qui ne le savent pas encore. Les récents titres de la presse tendent à leur donner raison. Des cybercriminels ont volé les informations des cartes de crédit et les données personnelles de milliers de clients de sociétés telles que les entreprises américaines Target et Home Depot (grande distribution) ou JPMorgan Chase (société de portefeuille). Les chercheurs en sécurité informatique ont découvert des failles fondamentales dans les constituants d'Internet, telle la vulnérabilité Heartbleed dans la bibliothèque de logiciels de cryptographie OpenSSL. Une destruction massive de données a obligé Sony Pictures Entertainment à

revenir au papier et au crayon. Des criminels ont accédé aux données de plus de 80 millions de clients de l'entreprise américaine d'assurance maladie Anthem. Et il ne s'agit que des incidents les plus connus.

Dans les années à venir, les cyberattaques vont probablement s'intensifier. Le problème nous concerne tous. Nous sommes tous, d'une façon ou d'une autre, connectés au cyberspace – *via* les téléphones, les ordinateurs portables, les réseaux d'entreprise –, et donc exposés. Le piratage des réseaux, serveurs, ordinateurs personnels et comptes en ligne est devenu une ressource essentielle tant des cybercriminels que des services d'espionnage des États. Votre réseau local d'entreprise, votre PC de jeu deviennent autant d'outils supplémentaires dans l'arsenal

des criminels – ou des cyberespions financés par le contribuable. Les ordinateurs compromis servent de tremplin pour l'attaque suivante ou deviennent les maillons d'un « botnet », un réseau malveillant de machines zombies contrôlées et louées à l'heure pour lancer des attaques par déni de service (qui rendent un service indisponible) ou distribuer des spams.

En réponse à de telles menaces, le réflexe des gouvernements consiste à militariser le cyberspace, à essayer de contrôler le monde numérique en s'appuyant sur des agences secrètes et des administrations centralisées. Mais cette approche ne fonctionnera jamais. Elle risque même d'empirer les choses. La cybersécurité est comme un problème de santé publique : seules, les agences de santé