

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.

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

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.

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.

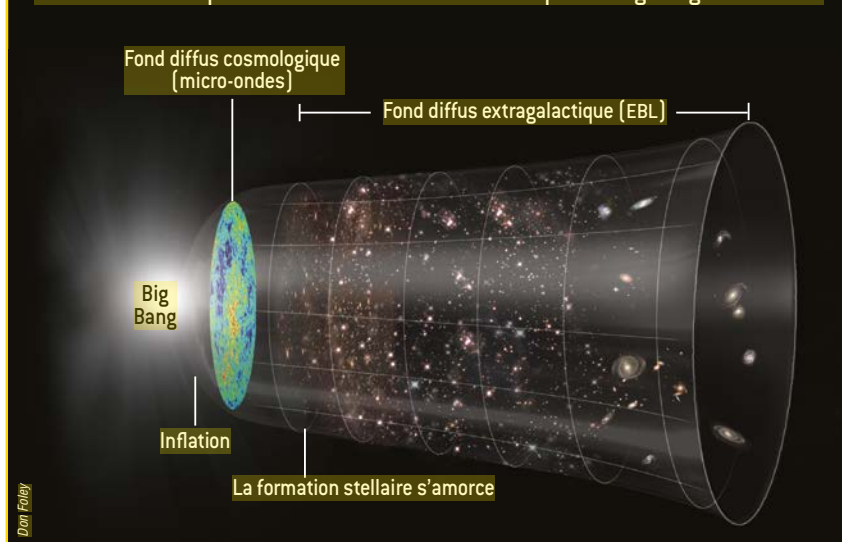
En 2011, Alberto Domínguez, Joel Primack et leurs collaborateurs ont amélioré ces limites en additionnant la quantité de lumière infrarouge et visible, observée par des télescopes au sol et dans l'espace, émise par les galaxies allant des plus proches à celles distantes de 8 milliards d'années-lumière (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

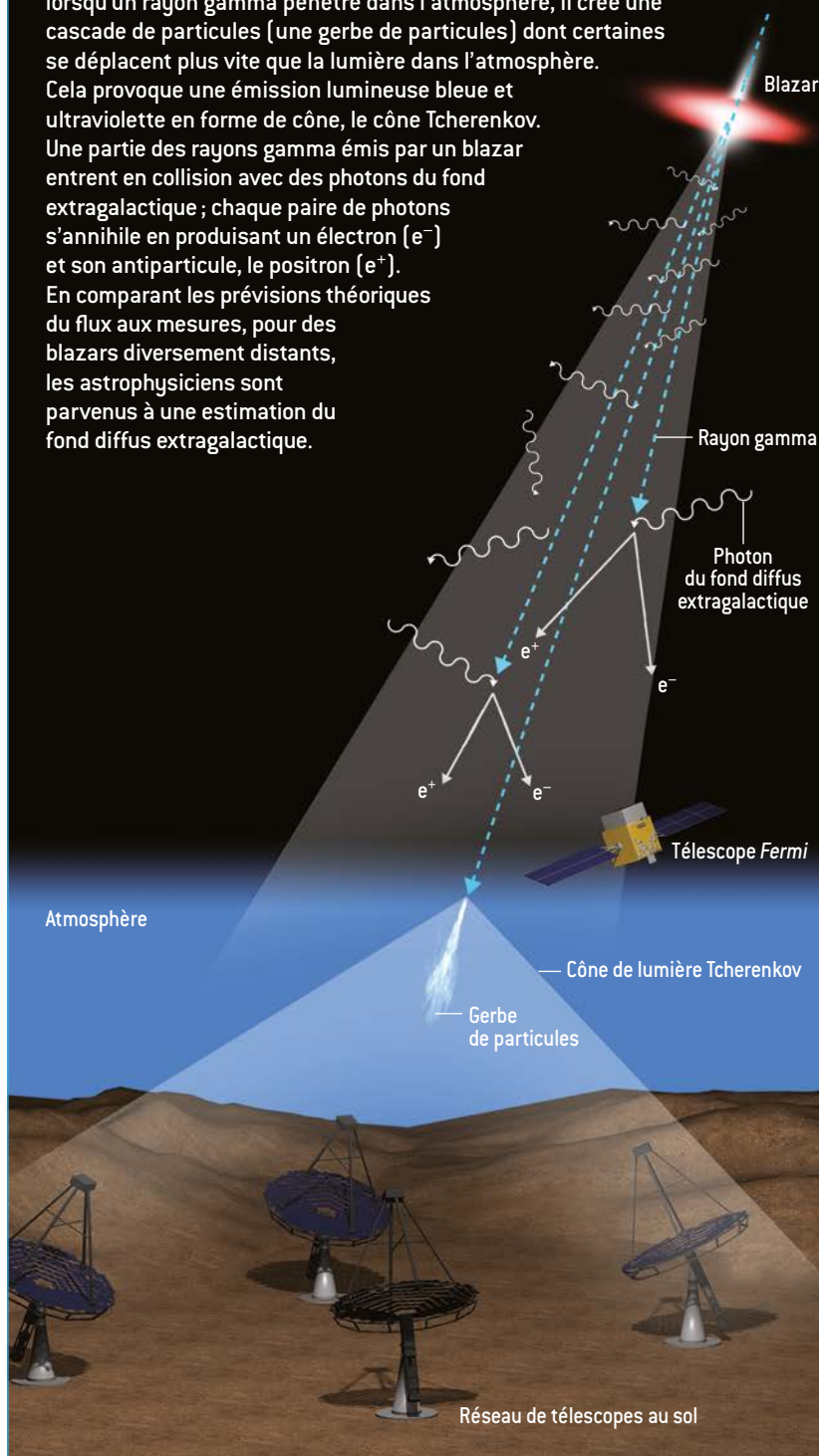
LE FOND DIFFUS EXTRAGALACTIQUE

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