



UN UNIVERS OPAQUE ET TRANSPARENT

PAR

M^{me} Catherine CÉSARSKY

Membre de l'Académie des sciences

La tâche de l'astrophysicien est de dresser l'inventaire de l'univers et de détailler sa structure et son évolution. L'univers n'est accessible que par l'observation, et la lumière est le principal messenger. Aujourd'hui, l'astrophysicien ne se contente pas de capter la lumière visible des astres, la seule à laquelle ses yeux sont sensibles ; il sonde le ciel dans toutes les couleurs de l'invisible, des douces ondes radio aux violents rayons gamma, en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les rayons X. Chacun de ces rayonnements apporte des indications distinctes, qu'il faut décrypter, sur les phénomènes physiques qui régissent l'univers. Mais ces signaux ne lui parviennent que si les rayons lumineux ne sont pas déviés ou absorbés entre leur lieu d'émission et la Terre, c'est-à-dire si, pour eux, l'espace intervenant est transparent.

Dans un lieu où le ciel nocturne est très pur, on perçoit à l'œil nu non seulement des étoiles et des étendues laiteuses, mais également des régions où il ne semble pas y avoir d'étoiles. On appelle ces portions sombres du ciel les nébuleuses obscures. Ainsi, les Indiens des hauts plateaux du désert de l'Atacama ne se repéraient pas sur la voûte céleste en dessinant des constellations d'après la position des étoiles, comme nous, mais en traçant les contours des nébuleuses obscures, en cherchant des ressemblances avec des formes connues d'animaux, et en leur attribuant des noms : la Vigogne, le Lama, le Renard...

Les nébuleuses obscures ont révélé aux astrophysiciens l'existence de matière diffuse très hétérogène entre les étoiles. En réalité, il y a évidemment aussi des étoiles dans la direction des nébuleuses obscures, mais lorsqu'elles sont situées à

l'arrière, leur lumière ne parvient pas à traverser les concentrations de gaz interstellaire, qui sont comme des rideaux tendus entre elles et la Terre. Les nuages interstellaires, composés essentiellement d'hydrogène et d'hélium, contiennent aussi de minuscules grains de poussière, de taille comparable à la longueur d'onde de la lumière visible. Les grains, qui ne constituent qu'environ 1 % de la masse du nuage, absorbent ou diffusent très efficacement la lumière visible. En conséquence, les nuages sont opaques dans le visible. Pour scruter l'intérieur des nuages ou pour voir au-delà, on fait appel à des instruments capables de détecter des lumières, de l'infrarouge aux ondes radio, dont les longueurs d'onde sont supérieures à la taille des grains de poussière.

L'hydrogène sous forme atomique émet des ondes radio à une longueur d'onde de 21 cm. À ces longueurs d'onde, les trajectoires des rayons lumineux sont peu perturbées par les rencontres avec les grains de poussière, donc les nuages sont transparents. On peut donc facilement, grâce à l'émission de l'hydrogène atomique, localiser et cartographier les nuages de gaz, tant denses que diffus. Mais dans des nuages massifs où le gaz est particulièrement dense, les atomes d'hydrogène se relient deux par deux en molécules, comme ils le font dans l'air que nous respirons, et du coup il n'y a plus d'émission à la longueur d'onde de 21 cm. Pour l'hydrogène moléculaire il n'y a malheureusement pas d'émission caractéristique dans les ondes radio ; mais on détecte dans les nuages denses de nombreuses émissions dues à une grande variété de molécules, et en particulier celle du monoxyde de carbone, qui nous renseignent partiellement sur la masse et la température des nuages.

C'est au sein des nuages moléculaires que se forment les étoiles, et cela fait des décennies qu'on souhaite observer le déroulement de ce phénomène. Les radiotélescopes millimétriques au sol, tel l'interféromètre de l'IRAM au plateau de Bure, près de Gap, avaient donné quelques pistes. Mais ce n'est que très récemment, grâce au satellite européen Herschel – actuellement en orbite autour du soleil avec à bord le plus grand télescope spatial de l'histoire, d'un diamètre de 3,50 m, et des instruments novateurs dans l'infrarouge lointain – que l'on a pu faire des observations fines de l'intérieur de ces nuages si opaques à d'autres longueurs d'onde. On a découvert qu'à l'intérieur des nuages, le gaz est réparti en filaments comme un immense macramé. Sur les branches les plus denses, sous l'effet de

l'attraction gravitationnelle, la matière s'effondre le long des filaments, amenant la formation de cœurs denses de matière. Certains d'entre eux atteindront à terme des densités centrales et des températures suffisamment élevées pour que des réactions de fusion nucléaire puissent se déclencher, et deviendront des étoiles. Depuis des décennies également, les astrophysiciens essayent de comprendre quels sont les processus qui déterminent la répartition des étoiles en fonction de leur masse ; les observations de l'IRAM et d'Herschel tendent à montrer que la structure chaotique du nuage, acquise en avance du processus de formation d'étoiles, joue un rôle décisif dans la genèse de la fonction de masse des étoiles.

L'une des dernières fenêtres d'observation qui vient de s'ouvrir est celle des rayons gamma de très haute énergie. Ces rayons interagissent avec l'air dans la haute atmosphère terrestre et produisent des flashes de lumière bleue, que l'on sait depuis peu détecter. On pourrait penser que ce rayonnement, le plus énergétique de l'univers, serait aussi le plus pénétrant, le plus immuable, et qu'il pourrait donc nous apporter sans fléchir des informations sur les confins de l'univers. En fait, il n'en est rien : pour les rayons gamma de très haute énergie, l'univers est loin d'être transparent. Ces rayons sont fragiles, ils perdent petit à petit leur énergie en traversant l'espace entre les galaxies. En effet, cet espace est empli de lumière provenant des étoiles et des galaxies et par un rayonnement qui est présent dans tout l'univers, relique de l'explosion originelle, le Big Bang. Les rayons gamma de haute énergie ont des énergies très supérieures à l'énergie de masse ($E = Mc^2$) des protons et surtout à celle des électrons. Ils interagissent avec les lumières à d'autres longueurs d'onde, et au gré de leurs rencontres, leur énergie se transforme en matière ; des paires d'électrons et de leurs contreparties à charge électrique positive, les positrons, sont créées. En conséquence, aux énergies les plus élevées observées, équivalentes à 1 000 fois l'énergie de masse d'un atome hydrogène, on ne peut pas voir de source de rayons gamma plus distante qu'environ 300 millions d'années-lumière, soit seulement environ 0,5 % du rayon de l'univers observable.

Le problème ne se pose pas si l'on s'intéresse à des photons gamma dont les énergies sont trois ordres de grandeurs plus basses. Dans cette gamme d'énergie, l'univers est bien transparent. À l'aide d'instruments placés à bord de satellites, les astronomes détectent des bouffées d'émissions de rayons gamma qui durent de

quelques secondes à quelques minutes. Les directions d'arrivée sont réparties de manière uniforme dans le ciel, sans aucun lien avec les contours de notre galaxie, la Voie lactée, ce qui indique que les bouffées d'émission sont provoquées par des événements lointains, bien au-delà de la Voie lactée. On a pu déterminer la distance d'une partie d'entre eux : certains figurent parmi les astres les plus lointains que nous connaissions actuellement. Ils doivent donc être intrinsèquement extrêmement brillants, puisque l'énergie lumineuse qui nous atteint est si élevée, en dépit de l'énorme distance qui nous sépare. On attribue ces explosions cataclysmiques à la mort d'étoiles de très grande masse.

Comme la lumière se propage à une vitesse finie, lorsque l'on observe un astre lointain, on le voit comme il était dans le passé. Les sursauts gamma, que nous sommes en mesure de détecter dans la majeure partie de l'univers observable, apportent des informations précieuses sur l'histoire de la formation d'étoiles de grande masse dans l'univers, depuis les premières générations d'étoiles jusqu'à présent.

Nous avons vu comment la large palette électromagnétique à laquelle nous avons accès permet de sonder des phénomènes très divers dans l'univers, pour comprendre son évolution et l'origine de ses composantes. Ainsi, avec les sursauts gamma, on a déjà pu observer un phénomène qui s'est déroulé alors que l'univers n'avait que 5 % de l'âge qu'il a actuellement. Mais peut-on remonter encore plus loin dans le temps ? Pour tenter de répondre à cette question, il faut reprendre le problème à l'envers ; au lieu de partir du présent et de remonter le temps, il faut partir du début, de l'origine des temps. Sur la base d'un ensemble d'observations très diverses mais concordantes, les astrophysiciens considèrent aujourd'hui que l'univers est né dans une grande explosion, le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années. Il était, au départ, extrêmement chaud et dense. Dans ce chaudron apocalyptique, le rayonnement et les particules élémentaires échangeaient leurs énergies, le rayonnement engendrant la matière et réciproquement, un peu comme la création de paires électrons-positrons émanant des interactions entre les rayons gamma de haute énergie et la lumière des étoiles dont je vous parlais tout à l'heure. Outre peut-être un ensemble de particules élémentaires qui nous restent à découvrir, les constituants des noyaux de la matière normale, ainsi que des

électrons et des positrons, ont été créés. Quand l'univers avait un âge de l'ordre de la dizaine de microsecondes, les noyaux d'atomes n'existaient pas encore ; à la place, il y avait une soupe de leurs constituants, un plasma de quarks et gluons. On arrive aujourd'hui à reproduire les conditions de l'univers primordial en provoquant des collisions de noyaux lourds dans les accélérateurs les plus performants. Ainsi, au CERN à Genève, grâce au LHC, on a commencé à examiner avec l'instrument ALICE les propriétés du plasma de quarks et gluons.

L'expansion était rapide ; l'étirement continu de l'espace amenait une diminution de la densité énergétique de lumière et de matière équivalente à un refroidissement. Puis les quarks et les gluons ont été confinés dans des noyaux d'atomes et la matière normale s'est retrouvée majoritairement sous la forme de protons, qui sont des noyaux d'atomes d'hydrogène, et d'électrons. À ces températures élevées, la lumière empêchait que des atomes neutres d'hydrogène, un proton lié à un électron, puissent perdurer. Les électrons n'étaient donc pas attachés aux noyaux, mais se déplaçaient librement, et déviaient fortement les rayons lumineux qui passaient près d'eux, les obligeant à décrire des trajectoires désordonnées, chaotiques, de sorte que l'univers était totalement opaque.

Mais au bout de 380 000 ans, l'énergie des grains de lumière avait tellement diminué comme conséquence de l'expansion qu'ils n'étaient plus capables d'arracher les électrons aux atomes d'hydrogène. En l'absence d'électrons libres, les trajectoires des rayons lumineux n'ont plus été perturbées de façon significative, et l'univers est devenu transparent à son propre rayonnement. La lumière originelle, découplée de la matière, a continué son expansion tout en gardant l'empreinte des petits grumeaux initiaux, graines de galaxies, à partir desquels toute la structure de l'univers actuel allait émerger. Aujourd'hui, le rayonnement fossile du Big Bang est toujours là, mais sous l'effet de 13,7 milliards d'années d'expansion, il n'est plus qu'à une température de 3 degrés absolus, soit -270 degrés centigrades, ce qui correspond à une émission dans les micro-ondes. Il est le témoin direct le plus précoce dont nous puissions disposer pour comprendre l'origine de l'univers, et il est donc porteur de renseignements de toute première importance pour la cosmologie. Le satellite européen Planck, lancé en même temps que le satellite Herschel et toujours en orbite, nous fournit les données les plus précises.

À partir de 380 000 ans, l'univers était bien devenu transparent, mais il n'y avait pas grand-chose à voir : pas encore d'étoiles ni de galaxies, uniquement du gaz neutre. On appelle cette période les âges sombres. L'expansion se poursuivait, mais en même temps la gravité jouait son rôle de grand rassembleur et remodelait les inhomogénéités originelles, densifiant les zones denses, vidant encore plus les zones vides. On pourra un jour, à l'aide d'énormes radiotélescopes très innovants, mesurer, grâce à l'émission à 21 cm de l'hydrogène atomique, l'évolution des accumulations de gaz dans cette période. Les âges sombres ont pris fin, quelques centaines de millions d'années plus tard, à une date que les astrophysiciens n'ont pas encore pu déterminer, avec la formation des premières étoiles et galaxies. La nouvelle lumière, née cette fois des réactions nucléaires au cœur des étoiles, recommença immédiatement à séparer les électrons des protons dans les atomes d'hydrogène ; le gaz entre les galaxies est ionisé, mais trop dilué maintenant pour rendre l'univers opaque dans le visible.

On pourrait penser qu'ayant tiré parti des dernières avancées de la technologie, comme nous avons su le faire jusqu'ici, pour traquer à toutes les longueurs d'onde les secrets de l'univers, nous aurions réussi à les percer. Mais il n'en est rien : nous savons que la matière « normale », celle dont nous-mêmes et la Terre sommes constitués, est en fait moins de 5 % de la matière/énergie totale ; que le reste, de nature inconnue, est en partie ce que nous appelons matière noire, capable d'exercer une attraction gravitationnelle et par conséquent, comme prédit par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, d'infléchir la trajectoire des rayons lumineux. Nous croyons savoir aussi qu'une force mystérieuse s'exerce sur l'univers et accélère son expansion ; on parle d'énergie noire, qui emporte la plus grande part de la matière/énergie de l'univers. Une autre façon pour l'univers d'être opaque... cette fois-ci, à notre entendement.