

# L'astrophysique multi-messager

Par D. GIALIS, astrophysicien

**H**istoriquement, l'astronomie des grecs, celle qui était pratiquée par les philosophes, les scientifiques et les astrologues (de Ptolémé à Tycho Brahé en passant par Aristote) était basée sur l'observation à l'œil nu du ciel. Cela était suffisant pour essayer de comprendre la périodicité des phénomènes astronomiques comme le mouvement de la Lune, du Soleil et de quelques planètes (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). La périodicité de certains événements comme les éclipses pouvait être étudiée assez précisément et rythmait même la vie quotidienne de certains peuples comme les Incas ou les Mayas en Amérique du Sud. Que ce soit par peur de certaines divinités, par besoin de prédire l'avenir ou simplement les saisons, l'astronomie jouait un rôle important pour nombre de dirigeants, rois ou empereurs (comme en Chine, par exemple). La survenue d'une comète ou l'apparition d'une supernova pouvaient être perçue comme une source d'angoisse pour quiconque associait les phénomènes célestes à des manifestations divines !

Mais cela ne disait rien de la physique sous-jacente ; on ne savait pas si les astres obéissaient aux mêmes lois que celles que l'on imaginait sur Terre et finalement, cela était appuyé par le fait que les lois divines, celles du ciel, devaient forcément être différentes des lois terrestres ou humaines. A partir de la Renaissance, les astronomes (Galilée, Képler, Copernic et Newton) ont pu regarder le ciel avec les premières lunettes et commencer à faire des mesures de plus en plus précises sur les positions ou les trajectoires des astres. Non seulement on émit l'hypothèse que la Terre pouvait ne pas être le centre de l'Univers mais, en plus, on s'aperçut, en observant les satellites de Jupiter, que les astres ne tournaient certainement pas tous autour de notre planète et que nous n'étions pas au centre de l'Univers. Ces nouvelles méthodes d'observation, liées au développement instrumental, ont marqué le début de ce que l'on a appelé l'*astrophysique* : pour la première fois, les scientifiques avaient les moyens de développer certaines théories quant aux

phénomènes observés et de tester leurs hypothèses par l'observation fine du ciel.

L'astrophysique a alors connus un essor spectaculaire dont l'une des plus grandes découvertes fût celle de la loi de la gravitation universelle et de la description mathématique des orbites planétaires (Newton, Leibniz, Hooke...). Cela est d'autant plus extraordinaire que, jusqu'à l'orée du vingtième siècle, la seule information ou le seul messager qui provenait du ciel était la lumière visible récoltée par les lunettes astronomiques et les télescopes. Puis la physique théorique s'est développée, et le début du vingtième siècle a vu la naissance des deux plus prodigieuses théories que sont la relativité générale et la physique quantique. La structure de la matière pouvait être révélée et étudiée ; après l'électron, à la fin du 19ème siècle, ce fut le tour du proton puis du neutron d'être découverts. C'est alors que l'italien Enrico Fermi, futur Prix Nobel de physique, prédit l'existence du neutrino. Ces nouvelles particules avaient-elles pour autant un intérêt pour l'astrophysicien ?

La première réponse ne se fit pas attendre et vint en 1912 avec Victor Hess. Ce physicien autrichien arriva à prouver, en utilisant des ballons atmosphériques, que des particules venant de l'espace arrivaient quotidiennement sur Terre. Ce fut le début de l'étude de ce que l'on appela les *rayons cosmiques*, c'est-à-dire l'ensemble des particules (protons, noyaux atomiques, électrons...) provenant de l'espace. Pour la première fois, il devenait possible d'observer un rayonnement d'origine extraterrestre non électromagnétique.

Parallèlement, au début des années 1920, alors même que la relativité générale n'était qu'à ses débuts, la physique stellaire connaissait une petite révolution : suite aux travaux de Francis Aston (Prix Nobel de Chimie en 1922), Sir Eddington expliqua pour la première fois, et grâce à la nouvelle formule d'Einstein ( $E=mc^2$ ), comment les étoiles pouvaient produire autant d'énergie à partir de réactions nucléaires utilisant protons, neutrons et neutrinos. La source d'énergie du Soleil (et

des autres étoiles...) et donc sa durée de vie étaient enfin connues.

Jusqu'au milieu du vingtième siècle cependant, la connaissance des rayons cosmiques progressa peu, tandis que l'observation du ciel via la lumière visible connût un essor très important, notamment avec la construction, à travers le monde, de nombreux télescopes dont le diamètre dépassait le mètre. Puis, la technologie s'améliorant, on commença à s'intéresser à d'autres domaines du spectre électromagnétique. On se mit à observer le ciel avec des radio-télescopes pour les ondes radio, puis avec des caméras infra-rouge, des détecteurs de rayons ultraviolets, de rayons X et enfin des détecteurs de rayons gamma que l'on envoya dans l'espace. Finalement, en quelques décennies, on avait réussi à obtenir une vue globale de notre Univers observable sur l'ensemble du spectre électromagnétique, ce qui, en soit, constituait déjà une révolution par rapport aux siècles passés.

Mais la physique nous a appris qu'il existe quatre forces ou interactions fondamentales dans la nature : la force gravitationnelle, la force électromagnétique et les forces d'interactions faible et forte. Aussi, pour étudier complètement un objet (astro-)physique ou tout autre processus physique, il est nécessaire de connaître le rôle de chacune de ses forces et, par suite, d'observer pour chacune d'entre elles le *messenger* correspondant.

Les photons composant la lumière des astres sont uniquement les *messagers* de la force électromagnétique, les rayons cosmiques et les neutrinos sont les messagers pour les forces d'interactions faible et forte, mais il a fallu attendre fin 2015 pour avoir enfin une observation astronomique liée à la force gravitationnelle, à savoir, l'observation d'ondes gravitationnelles. L'astrophysique multi-messenger était née : l'être humain est désormais devenu capable d'observer l'Univers selon toutes les voies disponibles connues et prévues par la physique.

Évidemment, le messenger le plus facile à observer reste le photon, mais les autres permettent néanmoins peu à peu d'avoir une autre vision de l'Univers. Lorsque l'on arrive à les détecter, ils sont généralement associés à des cœurs d'étoiles (comme les neutrinos solaires), à des explosions d'étoiles de type supernova, à la surface ou au voisinage d'objets compacts comme des naines blanches, des étoiles à neutrons ou des trous

noirs. Ces messagers non-électromagnétiques sont également produits en abondance par les cœurs actifs des galaxies ou par tous les phénomènes violents de l'Univers tels que les jets ou vents issus de sursauts gamma, de pulsars, dans lesquels on trouve de la matière sous forme de plasma ayant subi des chocs très énergétiques à des vitesses proches de celle de la lumière. Enfin, les ondes gravitationnelles, celles que l'on commence à détecter, sont produites lors de processus tels que la coalescence d'objets compacts comme, par exemple, deux trous noirs ou une étoile à neutrons et un trou noir.

### ***Quels sont les instruments qui permettent de faire des observations selon les différents messagers aujourd'hui ?***

***Pour les rayons cosmiques*** - Depuis le sol, l'observation des rayons cosmiques – par exemple – ne se fait pas directement. Il faut savoir que lorsqu'un rayon cosmique vient frapper les couches supérieures de l'atmosphère terrestre, il entre en collision avec les molécules présentes qui les composent. Cette collision brutale entraîne la création d'une multitude de particules, dites *secondaires*, qui vont à leur tour subir des collisions et produire d'autres particules jusqu'à ce que l'énergie des particules produites soit trop faible et que ces dernières soient absorbées peu à peu par l'atmosphère. Il en résulte la création d'une gerbe de particules dont la taille maximale, atteinte à une certaine altitude, sera directement liée à la nature (noyau atomique lourd, proton, électron...) et à l'énergie de la particule primaire (le rayon cosmique initial). Cette altitude peut être estimée soit grâce à des instruments embarqués sur des ballons atmosphériques ou des satellites, soit en observant les particules secondaires qui réussissent à atteindre le sol et au rayonnement électromagnétique de type Cerenkov (voir ci-après) qui est produit. Aussi, c'est à l'équipe du français Pierre Auger que l'on doit les premières mesures au sol à la fin des années trente. Ils arrivèrent à la conclusion que l'énergie des rayons cosmiques pouvait être supérieure à quelques  $10^{15}$ eV, ce qui dépassait, de loin, l'énergie des particules accélérées que l'on pouvait produire en laboratoire. Les gerbes de particules furent alors appelées *gerbes d'Auger*.

Que sait-on aujourd'hui des rayons cosmiques ?

L'Observatoire Pierre Auger, créé dans les années 2000, consiste à la mise en place, sur environ 3000 km<sup>2</sup> d'un désert Argentin, de plus de 1660 cuves d'eau destinées à recueillir les particules secondaires et de 27 télescopes à fluorescence pour détecter la lumière produite par ces mêmes particules durant leur trajet dans l'atmosphère. Conçu pour détecter les rayons cosmiques dont l'énergie dépasse les 10<sup>17</sup>eV, cet observatoire a permis de confirmer les premières mesures faites par un autre instrument du nom de HiRes (pour High Resolution fly's eye) qui montraient une accumulation de rayons cosmiques autour de 6x10<sup>19</sup>eV. Cet énergie seuil correspond à l'effet dit GZK (du nom de Greisen, Zatsepin et Kuzmin qui l'ont découvert en 1966) : on sait que le trajet des rayons cosmiques dans l'Univers peut être complexe, non seulement ils ne se propagent pas en ligne droite car ils sont sans cesse déviés par les différents champs magnétiques qu'ils traversent, mais en plus ils parcourent de longues distances à travers le bain de photons de basse énergie universellement présent, à savoir le fameux fond diffus cosmologique (ou CMB pour Cosmic Microwave Background). Pour les rayons cosmiques de basse énergie, l'interaction avec les photons du CMB reste faible, mais pour les rayons cosmiques dits de ultra-haute énergie (> 10<sup>19</sup>eV), ou UHECRs (pour Ultra-High Energy Cosmic Rays) la perte d'énergie peut être considérable. En effet, à chaque interaction, les UHECRs perdent de l'énergie en produisant des particules telles que les pions. Ainsi, on démontre que les UHECRs dont l'énergie observée est de l'ordre de 10<sup>20</sup>eV ne peuvent provenir que de sources situées à l'intérieur d'une sphère (centrée sur la Terre) d'environ 100 Mpc de rayon. Autrement dit, cela signifie que les UHECRs qui viennent de plus loin ont subi une perte d'énergie trop importante et viennent peupler les catégories de rayons cosmiques de plus faible énergie en arrivant au niveau de la Terre, d'où l'effet d'énergie seuil. Bien que le rayon de cette sphère, dite GZK, puisse paraître gigantesque, il reste néanmoins très inférieur à la taille de l'univers observable qui est supérieure à plusieurs milliers de Mpc : c'est aujourd'hui encore un problème car cela réduit considérablement les possibilités quant aux différentes origines des UHECRs.

Comment sont-ils accélérés et par quels objets ? Même si les sursauts gamma et les noyaux actifs de galaxies sont de sérieux candidats, l'incertitude demeure. Ce qui est sûr, c'est que les UHECRs sont produits par

les phénomènes les plus violents et les plus énergétiques de l'Univers.

**Pour les neutrinos** - Les neutrinos sont des particules de masse quasi-nulle qui n'interagissent que très peu avec la matière ordinaire si bien qu'il est très difficile de les observer. Pourtant, ce sont plusieurs dizaines de milliards de neutrinos qui traversent, à chaque seconde, chaque centimètre carré de notre corps.

Pour rappel, l'histoire du neutrino commença dès 1899 avec celle de la radioactivité lorsque Ernest Rutherford puis Paul Villard découvrirent ce qu'on appelle les désintégrations radioactives alpha, bêta et gamma. Dans la désintégration bêta, lorsqu'un neutron du noyau radioactif se transforme en un proton, il apparut tout d'abord que seuls des électrons étaient émis : malheureusement, si tel avait été le cas, l'énergie des électrons produits aurait dû être égale à l'énergie de masse perdue par le noyau. L'observation montra qu'il n'en était rien et que l'énergie des électrons semblait toujours être quelconque bien qu'inférieure à l'énergie attendue. D'où provenait cette différence d'énergie ? La réponse fût apportée par Wolfgang Pauli en décembre 1930 : la conservation de l'énergie ne peut être réalisée que si l'on suppose l'existence d'une nouvelle particule de charge électrique nulle. Ce dernier l'appela *neutron*. En 1932, James Chadwick découvrit une nouvelle particule : bien qu'électriquement neutre, elle semblait bien trop lourde pour correspondre au neutron imaginé par Pauli. C'est alors que Fermi, dès 1934, changea le nom de la particule de Pauli en *neutrino* (signifiant littéralement *petit neutron*) et que le nom de *neutron* resta attaché à la particule de Chadwick.

On sait aujourd'hui que les neutrinos sont de trois types (ou saveurs) ; il y a les neutrinos électroniques, les neutrinos tauiques et les neutrinos muoniques. Par un effet quantique, appelé effet MSW (pour Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein), les neutrinos qui voyagent dans l'espace changent périodiquement de saveur au cours de leur voyage vers la Terre. On appelle cela l'*oscillation périodique des neutrinos*. Ainsi, un neutrino électronique peut très bien, en arrivant sur Terre, s'être transformé en neutrino muonique ou tauique !

Mais le neutrino resta encore une hypothèse théorique durant de nombreuses années : il fallut attendre 1956 et les expériences de Frederick Reines et Clyde Cowan sur le

réacteur atomique de Savannah River aux États-Unis (Caroline du Sud) pour détecter les premiers neutrinos, ou plutôt les premiers antineutrinos, issus de la désintégration bêta. A cette époque, seule la proximité de sources radioactives intenses donnait une chance de détecter des neutrinos. Durant les décennies qui suivirent, les détecteurs se sont améliorés. En 1962, à Brookhaven sur l'île de Long Island, on découvrit une deuxième sorte de neutrino qui était liée non pas à un électron mais à un muon (particule plus lourde que l'électron mais de même charge). C'était le neutrino muonique.

Parallèlement, les premières observations réussies de neutrinos extraterrestres furent menées au fond d'une mine du Dakota du Sud, aux États-Unis, en utilisant plus de 600 tonnes de perchloroéthylène : il s'agissait de détecter les neutrinos issus des réactions nucléaires se produisant au centre du Soleil.

Notons enfin, en 1990, que c'est au CERN, à Genève, que l'on mit en évidence une troisième et dernière sorte de neutrino associée cette fois-ci à une particule tau. C'était le neutrino tauique.

Pour compenser l'extraordinaire capacité des neutrinos à traverser la matière sans encombre, il a fallu construire des détecteurs de plus en plus gros situés sous la mer - par exemple, avec l'expérience ANTARES - ou sous la terre - avec le détecteur japonais Super-Kamiokande ou les expériences canadiennes du SNO - pour n'espérer voir la trace que de quelques neutrinos et les plus énergétiques seulement. Des détecteurs ont même été construits sous les glaces de l'Antarctique avec l'observatoire IceCube !

L'observation des neutrinos se fait toujours de façon indirecte : les détecteurs peuvent être - par exemple - constitués de grandes cuves remplies d'eau très pure. Lorsqu'un neutrino frappe une molécule d'eau, un électron peut être éjecté avec une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'eau. Il se produit alors un flash de lumière bleue lorsque l'électron chargé se déplace dans l'eau, correspondant à ce que l'on appelle l'*effet Cerenkov*. C'est justement cette lumière qui est détectée puis analysée, et qui est le signe qu'un neutrino est passé par là.

La première détection de neutrinos, qui provenaient d'une source extérieure au Système Solaire, et qui a pu se faire conjointement avec une observation optique,

fut celle effectuée lors de l'explosion de la célèbre supernova 1987a, le 23 février 1987, visible à l'œil nu dans le Grand Nuage de Magellan. Les neutrinos observés résultaient directement de la transformation des protons en neutrons au cœur même du reste de la supernova : autrement dit, on était les témoins de réactions nucléaires ayant lieu à l'intérieur d'une étoile située à plus de 170 000 années-lumière et on assistait là à la naissance d'une étoile à neutrons !

Comment s'est développée aujourd'hui l'observation des neutrinos ? Construit en 2010, l'observatoire à neutrinos IceCube est constitué d'environ un milliard de tonnes de glace d'eau, soit un volume  $1 \text{ km}^3$ , placé à une profondeur comprise entre 1,4 et 2,4 km sous le Pôle Sud. Il contient pas moins de 5160 phototubes optiques chargés de mesurer la lumière émise par les particules produites lors d'une interaction entre un neutrino et la glace. Dès 2012, il a permis de découvrir un flux de neutrinos de haute énergie dont le spectre en énergie (de type loi de puissance d'index -2,5) allait d'environ 100 TeV (soit  $10^{12} \text{ eV}$ ) jusqu'à 1 PeV (soit  $10^{15} \text{ eV}$ ), les plus énergétiques montant jusqu'à environ 10 PeV. La détermination de la saveur de ces neutrinos a montré que les observations étaient bien en accord avec le phénomène d'oscillation périodique, évoqué précédemment, et ce, sur des distances cosmologiques.

Pour les neutrinos de plus haute énergie (ou HENs pour High Energy Neutrinos), l'expérience ANITA, avec des ballons sondes de haute altitude placés sur des orbites circumpolaires au-dessus de l'Antarctique, a permis de détecter des neutrinos ayant des énergies supérieures à 100 PeV. Cette observation a apporté des contraintes supplémentaires sur les objets à l'origine de cette émission de neutrinos, et le lien avec les sources d'UHECRs a pu être conforté : en effet, il faut savoir que ces HENs sont produits lorsque des UHECRs entrent en collision avec des photons de faible énergie, comme ceux du fond diffus cosmologique, et produisent des neutrons et des pions qui vont, à leur tour, se désintégrer en donnant les neutrinos et des photons gamma de haute énergie. On comprend dès lors que l'observation multi-messenger des UHECRs, des neutrinos et des photons gamma reste donc fondamentale pour comprendre des objets susceptibles de les produire comme les sursauts gamma, les noyaux actifs de galaxies ou les vents de pulsars.

Jusqu'à 2017, aucune source de HENs n'avait pu être identifiée : cela changea avec l'observation du blazar TXS0506+056. Un blazar est un noyau actif de galaxie particulier puisqu'il possède, en son centre, un trou noir massif qui émet un jet relativiste de matière pointant vers la Terre : ils sont classés comme des objets de type BL Lac ou comme des radio-quasars ayant un spectre plat. Cette observation montra que les blazars étaient responsables d'environ 20 % des HENs détectés par IceCube, et apporta donc de nouvelles contraintes théoriques pour les modèles, par exemple, ceux qui prévoient la production d'UHECRs.

#### **Pour les ondes gravitationnelles –**

Rappelons brièvement ce que sont les ondes gravitationnelles. Énoncée par Albert Einstein au début du siècle dernier (1915-1916), la théorie de la relativité générale propose une construction géométrique de l'espace-temps dont les propriétés - comme la distance spatio-temporelle entre deux points - sont intimement liées à son contenu physique, à savoir, la matière (ou énergie) présente dans l'Univers. C'est à partir de ce lien entre l'espace-temps et la masse qu'il a été possible d'imaginer la création d'ondes gravitationnelles : ces dernières ne représentent rien d'autres que la manifestation d'une perturbation de la courbure de l'espace-temps créée par une masse en mouvement. En d'autres termes, tout comme une pierre que l'on jette dans l'eau produit des ondes à la surface d'un lac, toute masse en mouvement accéléré crée des ondes gravitationnelles en modifiant l'espace-temps qui l'entoure. Plus précisément, une des différences est que ces ondes sont quadripolaires - on parle aussi d'*ondes tensorielles transversales* - c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être produites que s'il n'y a pas de symétrie sphérique et de symétrie axiale dans les mouvements de la masse qui les génère, par exemple, deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre. En outre, leur amplitude décroît également plus vite avec la distance que l'amplitude d'une onde monopolaire (par exemple, une onde sonore créée par une pierre dans un lac) ou que celle d'une onde dipolaire (par exemple, l'onde radio créée par une antenne). Enfin, bien que, par nature, elles soient différentes des ondes électromagnétiques, il est remarquable que les ondes gravitationnelles se propagent dans l'Univers à la même vitesse que la lumière. L'inconvénient est qu'elles interagissent très peu avec la matière qu'elles traversent, ce qui rend leur détection très difficile, mais l'avantage est qu'elles traversent l'Univers

sans être absorbées par les objets qu'elles rencontrent. Lorsqu'elles sont produites par de petites masses, ces ondes restent extraordinairement faibles en amplitude et sont donc inobservables. Il faut qu'elles soient générées par des astres de plusieurs masses solaires concentrées dans des régions suffisamment petites de l'espace-temps et accélérées à des vitesses comparables à celle de la lumière pour commencer à être détectables par nos instruments actuels. Dans des phénomènes violents comme la fusion d'étoiles à neutrons ou de trous noirs, l'énergie libérée et transportée par ces ondes à travers l'espace peut être colossale. Par exemple, lors de la fusion des deux trous noirs du 14 septembre 2015, dont les masses étaient estimées à 36 et 29 fois la masse du Soleil, la puissance maximale émise sous la forme d'ondes gravitationnelles était dix fois plus importante que la puissance émise sous forme de lumière par l'ensemble des étoiles et des galaxies de l'Univers observable. Cela correspond à la transformation en énergie ( $E=mc^2$ ) de trois fois la masse du Soleil et ce, en seulement cinq secondes !

La détection directe des ondes gravitationnelles est à la fois simple à comprendre et extrêmement difficile à réaliser. Pour cela, on utilise la technique couramment utilisée en astronomie : l'interférométrie.

Un interféromètre est un appareil permettant de séparer un front d'onde électromagnétique, un rayon de lumière, en deux morceaux et de les recombinaison ensuite. A quoi cela sert-il ? Si les rayons de lumières parcourent séparément deux distances légèrement différentes, leur recombinaison conduit à l'observation d'une figure d'interférence qui correspond à la superposition des ondes lumineuses et qui ressemble à une succession de franges ou de zones claires et de franges sombres. Ainsi, toute variation des distances parcourues par la lumière dans le dispositif aboutit à des modifications de contraste dans cette figure d'interférence. Un tel procédé, appelé interférométrie, a été décrit pour la première fois par Hippolyte Fizeau, au milieu du dix-neuvième siècle, puis développé par Albert Michelson et Francis Pease au début du siècle dernier. Depuis les années soixante-dix et sous l'impulsion, notamment, du français Antoine Labeyrie, il est couramment utilisé en astronomie observationnelle aussi bien avec des télescopes dans le domaine optique qu'avec des radiotélescopes, ces instruments jouant leur rôle de collecteurs de lumière en amont du dispositif. Cette technique permet

d'obtenir une résolution inégalée sur les objets observés qui est équivalente à celle que l'on aurait avec des instruments d'une taille égale à la séparation des télescopes !

Mais quel est le lien avec les ondes gravitationnelles ?

L'idée est simple, mais au lieu d'injecter dans l'interféromètre de la lumière issue des objets de l'Univers, on utilise des rayons laser monochromatiques. Ce qui est intéressant et important ici, ce n'est pas la nature ni l'origine de la lumière, mais plutôt l'analyse des perturbations qu'elle va subir. Reprenons : un interféromètre de type Michelson est constitué de deux bras perpendiculaires. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans l'interféromètre, il est séparé en deux au point d'intersection des deux bras. Au bout de chacun des bras, un miroir permet aux rayons lumineux de faire un aller-retour afin de pouvoir être recombines. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le dispositif, la longueur des bras, c'est-à-dire la distance parcourue par les rayons lumineux varie très légèrement. Évidemment, plus la longueur des bras est longue et plus la variation sera importante. Les interféromètres ont généralement une taille de un à deux mètres dans les laboratoires d'optique. Ils ne sont pas conçus pour détecter une onde gravitationnelle car ils sont beaucoup trop petits. Pour faire cela, il a fallu construire des dispositifs dont la taille est de plusieurs kilomètres. Une des nombreuses difficultés technologiques est que les bras sont en réalité des tubes dans lesquels un vide poussé est réalisé afin de ne pas perturber la propagation des faisceaux laser. La précision dans les mesures de variations de distance atteint alors le centième de la taille d'un proton !

Construit aux États-Unis, le LIGO (pour Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory) est constitué d'un interféromètre géant ayant un détecteur situé en Louisiane et un autre dans l'état de Washington. Chaque détecteur à la forme de bras en forme de L d'une longueur de 4 km ! C'est le LIGO qui a, pour la première fois en 2015, permis d'observer les ondes gravitationnelles issues d'une coalescence de trous noirs de masses stellaires. On appela ce nouvel objet GW150914. Moins de 0,4 s après la détection de ces ondes gravitationnelles, un signal fût détecté par le GBM du satellite Fermi dans le domaine des rayons gamma. Malheureusement, la précision de pointage de cet instrument - et l'absence de détection par d'autres instruments (comme AGILE ou

INTEGRAL) - ne permet pas de conclure : était-ce là une simple coïncidence, ou bien était-ce le même objet qui avait produit les ondes gravitationnelles et le sursaut gamma. Le débat est encore intense aujourd'hui dans la communauté scientifique pour savoir si cela constitue ou non la première observation d'un sursaut gamma court issu de la coalescence de deux trous noirs. D'autres coalescences de ce type ont bien été observées depuis par LIGO et par l'interféromètre VIRGO en Italie, mais aucune n'a fait apparaître d'émission gamma associée...

Pourtant, le 17 août 2017, un autre événement marqua les astrophysiciens : ce jour-là, LIGO et VIRGO détectent tous les deux des ondes gravitationnelles issues d'un type similaire de coalescence à savoir, celle d'un trou noir avec une étoile à neutrons. Moins de deux secondes plus tard, le GBM enregistre un sursaut gamma appelé GRB170817A : cette fois-ci, d'autres instruments permettent de localiser ce deuxième événements et fournissent différents spectres. Il n'y a plus de doute, GRB170817A et GW170817, l'événement gravitationnel associé à la coalescence, sont deux facettes d'un même événement qui s'est déroulé à plus de 40 Mpc de la Terre.

L'observation conjointe d'un signal gravitationnel et d'un signal électromagnétique a donc permis de prouver, dans ce dernier cas, deux choses : la première est le lien qui existe entre la coalescence d'objets compacts et la naissance des sursauts gamma dits *courts* (c'est-à-dire durant moins de 2 s). Cette idée avait été développée depuis une trentaine d'année mais elle n'avait jamais pu avoir de confirmation expérimentale. La seconde avancée est que la réception quasi-simultanée des deux types de signaux montra que les ondes gravitationnelles avaient bien la même vitesse que celle de la lumière. Non seulement cela a conforté encore plus la validité de la relativité générale mais, en plus, cela a permis de discréditer certaines théories concurrentes qui avaient pu être proposées jusqu'alors. On notera que la découverte des sources d'ondes gravitationnelles fût récompensée par un Prix Nobel en 2017 attribué à Barish, Thorne et Weiss.

### ***Quelles évolutions doit-on attendre ces prochaines années ?***

Comme nous l'avons vu, la détection d'une contrepartie optique et d'une émission de neutrinos associées à la coalescence de deux

trous noirs est très attendue, étant donné que plus de dix événements de ce type ont déjà été observés par LIGO et VIRGO : cela serait très utile pour détailler et mieux comprendre les environnements de tels objets. L'extension de telles observations à des trous noirs supermassifs apporterait également des contraintes cosmologiques sur l'origine de la matière noire.

L'observation conjointe de neutrinos de haute énergie avec des ondes gravitationnelles et des photons gamma émis lors de la coalescence d'étoiles à neutrons permettrait également de répondre à de nombreuses questions relatives aux modèles théoriques décrivant les sursauts gamma et leurs jets relativistes.

Une autre question demeure : alors que les candidats trous noirs détectés en rayons X suggèrent que leur vitesse de rotation est élevée, pourquoi les trous noirs détectés par LIGO ont-ils une faible vitesse de rotation ? Seules de futures observations pourront permettre de répondre à cette question.

Enfin, la cosmologie est également directement intéressée dans la détection des neutrinos tout comme dans celle des ondes gravitationnelles : rappelons que si l'Univers a mis plus de 377 000 ans pour devenir transparent aux photons, il ne lui a fallu qu'une seconde pour être transparent aux neutrinos ! Les neutrinos sont donc parmi les premiers messagers témoins des âges les plus reculés de l'Univers. Quant à la détection des ondes gravitationnelles primordiales, elles apporteraient de nouvelles contraintes pour tous les modèles cosmologiques, y compris le modèle standard et notamment en ce qui concerne la période inflationnaire qui a suivi le Big Bang.

Pour terminer, remarquons que deux nouveaux interféromètres gravitationnels sont en construction : le premier est le détecteur japonais KAGRA construit dans une mine de Kamioka au Japon et qui devrait avoir la même sensibilité que LIGO et VIRGO. La livraison est prévue vers 2024. Le second est un nouvel observatoire LIGO en Inde qui constituerait donc le troisième détecteur associé aux deux précédents. Enfin, certains imaginent déjà des détecteurs d'ondes gravitationnelles en orbite dans l'espace ou sur la Lune, mais cela est une autre histoire !

### ***Quelques liens et articles pour aller plus loin***

<https://lejournal.cnrs.fr/billets/lepopee-des-neutrinos>

<https://icecube.wisc.edu/>

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

<http://www.ligo.org>

<https://www.ligo.caltech.edu/LA>

***A la poursuite des ondes gravitationnelles***, P. Binétruy, 2015, Ed. Dunod

***Trous noirs et distorsions du temps***, K. Thorne, 1997, Champs Flammarion.

***Multi-messenger astrophysics***, P. Meszáros & al., arXiv:1906.10212v2, 2019.

***Multi-messenger observations of GRBs : the GW connection***, E. Bissaldi, arXiv:1909.05960v1, 2019.

***Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger***, B. P. Abbott et al., Physical Review Letters, 12 february 2016.

***On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW170817***, B.P. Abbott & al., The Astrophysical Journal Letters, Volume 850, Issue 2, article id. L40, 18 pp, 2017.

***The Astrophysics of Ultra-High Energy Cosmic Rays***, K. Kotera & A.V. Olinto, 2011.

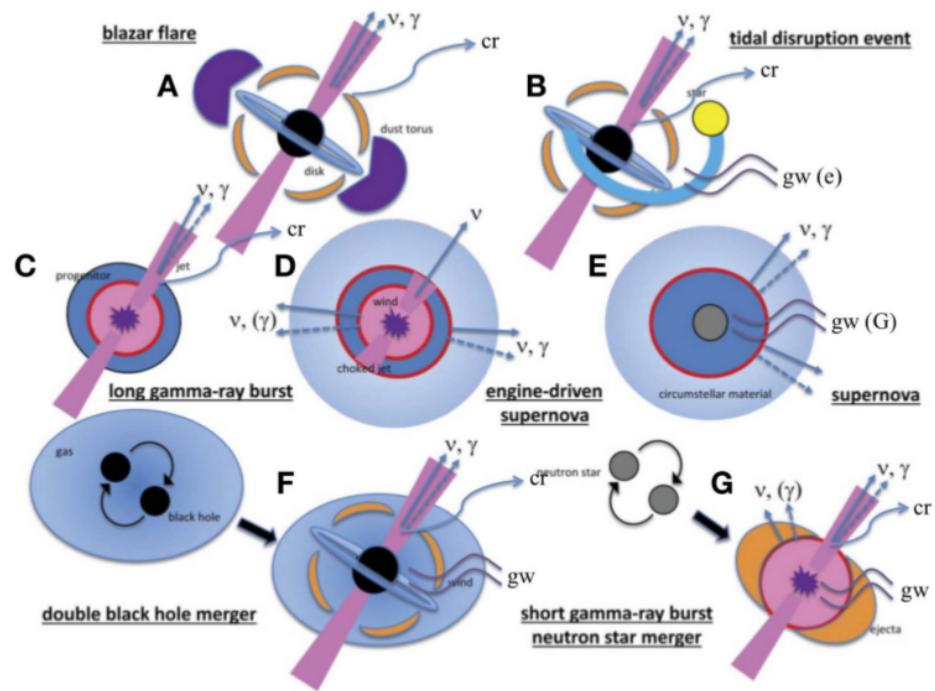


Fig. : Les sources d'émission multi-messager peuvent être : (A) un jet de blazar, (B) un effet de marée gravitationnelle, (C) un sursaut gamma long, (D) et (E) une supernova, (F) la coalescence de deux trous noirs ou (G) la coalescence de deux étoiles à neutrons donnant lieu à un sursaut gamma court. (Meszáros & al., 2019)