

Comment l'astronomie a élargie son regard sur l'Univers

Stephen N. Lyle

30 janvier 2024

Au cours des cent dernières années, notre compréhension de l'Univers a été transformée au point de devenir méconnaissable. Le but ici est d'expliquer comment cela s'est produit. Je passerai un peu de temps à parler de l'astronomie conventionnelle qui capte et analyse la lumière des objets célestes. Je parlerai ensuite de deux nouveaux types d'astronomie qui captent des signaux très différents provenant de ces objets.



FIGURE 1 – La galaxie d'Andromède, semblable à la nôtre et relativement proche de nous à une distance de seulement 2 480 000 années-lumière. Pour mettre les choses en proportion, cela représente environ dix fois le diamètre de cette galaxie et vingt fois le diamètre de notre propre galaxie, la Voie lactée. Image : Creative Commons Attribution 4.0

Où sommes-nous et que voyons-nous d'ici ?

Lorsque nous sortons par une nuit claire, toutes les étoiles que nous voyons au-dessus sont des étoiles de notre propre galaxie, et la plupart d'entre elles sont relativement proches, à des distances allant de quelques années-lumière à



FIGURE 2 – Un des premiers télescopes réfracteurs, entre les mains du doge de Venise, Leonardo Donato. Fresque par le peintre italien Giuseppe Bertini (1825–1858) en 1858. Image : Creative Commons Attribution 4.0

quelques dizaines ou centaines d’années-lumière. Notez qu’une année-lumière est une distance. C’est la distance parcourue par la lumière dans le vide en un an. Étant donné qu’il parcourt environ 300 000 km en une seconde seulement, une année-lumière équivaut à beaucoup de kilomètres. C’est pourquoi nous utilisons des années-lumière plutôt que des kilomètres en astronomie.

Par une nuit très claire, on peut également voir dans le ciel nocturne une bande de lumière plutôt floue, on pourrait même dire une lumière laiteuse, traversant le ciel de part en part. C’est la Voie lactée, qui donne son nom à notre galaxie. Et en effet, cette lumière est également produite par les étoiles de notre propre galaxie, mais elles sont si éloignées que nous n’arrivons pas les distinguer les unes des autres. Ils peuvent se trouver à plusieurs dizaines de milliers d’années-lumière, car notre galaxie a un diamètre d’environ 100 000 années-lumière. Le Soleil et notre système solaire sont situés à environ 30 000 années-lumière du centre de la galaxie. Notons enfin que la Voie lactée a la forme d’une spirale plutôt aplatie, du moins en ce qui concerne sa partie visible.

Il y a aussi quelques faibles taches de lumière qui ne sont clairement pas des étoiles. Celles-ci portent le nom collectif de « nébuleuses ». Il y a cent ans, on ne savait pas de quoi il s’agissait. On ne savait pas si elles se situaient parmi les étoiles de notre galaxie ou bien au-delà. Il s’avère que certaines y étaient et d’autres non. Par exemple, une autre galaxie comme la nôtre est visible à l’œil nu dans la constellation d’Andromède. Il s’agit de la galaxie d’Andromède, représentée sur la figure 1. C’est une galaxie spirale, plus grande que la nôtre et située à plus de deux millions d’années-lumière. Notez que cela signifie que nous le voyons tel qu’elle était il y a plus de deux millions d’années.



FIGURE 3 – Le télescope à réflexion de Newton de 1668. Image : Science Photo Library

Comment voir plus loin

La galaxie d'Andromède est à peine visible à l'œil nu. Afin de la faire apparaître plus clairement, nous avons besoin d'une sorte d'instrument capable de concentrer dans nos yeux davantage de lumière provenant de l'objet. Un instrument comme celui montré sur la figure 2. Il s'agit d'un télescope réfracteur ou lunette astronomique. Le premier d'entre eux a été inventé au début du XVII^e siècle. Ici, le doge de Venise fait un essai depuis sa fenêtre. Le doge aurait été moins intéressé par le ciel nocturne que par l'identification des navires sur le point d'arriver dans la lagune. C'était vers 1609. Derrière lui se tient Galilée qui enseignait les mathématiques, la mécanique et l'astronomie à l'université de Padoue, qui faisait alors partie de la République de Venise. Apparemment, Galilée a été richement récompensé pour avoir présenté cet équipement au doge. Mais il ne l'a pas inventé. Comme toutes les inventions de ce type et toutes les découvertes scientifiques, il est le résultat d'un immense effort collectif.

Le tube contient deux lentilles, chacune façonnée selon une forme spéciale, calculée à l'aide de la géométrie. Ils sont placés à une distance qui permet à l'instrument de capter et de concentrer davantage de lumière provenant de l'objet qu'il vise. L'image est amplifiée et détectée par la rétine de l'œil du spectateur. Il devient possible de résoudre les détails.

La figure 3 montre un autre instrument ancien, le télescope à réflexion d'Isaac Newton. Le tube est plus gros que celui de la lunette astronomique de Galilée car il possède un miroir à l'extrémité inférieure. Le miroir a une forme parabolique. En effet, les rayons de lumière provenant d'un objet distant comme une étoile ou une galaxie arrivent parallèlement les uns aux autres et un miroir



FIGURE 4 – L’Observatoire du Mont Palomar dans le comté de San Diego, en Californie, géré par le California Institute of Technology (Caltech). Image : Gerard T. van Belle, domaine public

parabolique les focalisera en un seul point quelque part dans le tube. Encore de la géométrie. Mais avant que les rayons convergents ne se rencontrent au foyer, un petit miroir plan au milieu du tube, près de l’extrémité ouverte, dévie les rayons vers un oculaire, une lentille en fait, visible sur le côté du tube. C’est là que le spectateur pose son œil. Newton l’aurait utilisé plus de cent ans après que Galilée ait utilisé sa lunette. Encore une fois, d’autres avaient eu l’idée d’utiliser un miroir pour capter davantage de lumière et la focaliser, mais c’est Isaac Newton qui construisit le premier instrument avec cette conception en 1668. Un autre produit de l’effort collectif.

L’avantage du télescope à réflexion est qu’on peut réaliser plus facilement de grands miroirs que de grandes lentilles. Et les grands miroirs (ou même les grandes lentilles) peuvent collecter plus de lumière provenant de l’objet cible. La figure 4 montre une vue de l’observatoire du mont Palomar en Californie. Il y a plusieurs grands télescopes ici, le plus grand étant le télescope Hale de 200 pouces (5,1 m), portant le nom de l’astronome George Ellery Hale. L’observatoire du mont Palomar était l’idée de Hale, et il y construisit le plus grand télescope du monde quatre fois de suite. L’article proposant ce qui allait devenir le télescope à réflexion de 200 pouces a été publié en 1928.

Au moment où les télescopes ont été inventés, toutes les informations dont nous disposions sur l’Univers se présentaient sous forme de lumière, et toute détection de cette lumière se faisait par la rétine de l’œil humain. Les astronomes devaient alors faire des croquis sur papier de ce qu’ils voyaient. Mais au moment où le télescope Hale était utilisé, une autre méthode de détection était devenue possible : les plaques photographiques. Collecter et focaliser la lumière est une chose, la détecter en est une autre. Bien entendu, les deux sont nécessaires. La détection devient un problème majeur par la suite.

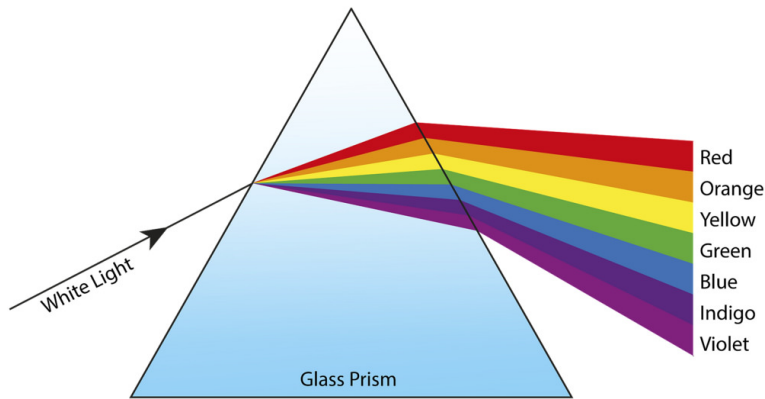


FIGURE 5 – Lorsque la lumière blanche traverse un prisme, elle se divise en toutes les couleurs de l’arc-en-ciel

Qu’est-ce que la lumière ?

Puisque la lumière est si importante en astronomie, commençons par donner une brève description de la physique qu’elle implique. La figure 5 montre ce qui se passe lorsqu’un faisceau de lumière solaire, essentiellement de la lumière blanche, traverse un prisme. Aujourd’hui, tout le monde sait ce que cela fait. Isaac Newton l’a fait il y a longtemps et bien d’autres ont fait l’expérience. La première chose que montre cette expérience est que la lumière blanche est en quelque sorte un mélange de couleurs. Cela peut paraître un peu étrange. Tous ceux qui ont des enfants savent que lorsque l’on mélange des peintures de différentes couleurs, cela donne quelque chose qui ressemble plus au noir ! Mais bien sûr, la lumière ne se produit pas en mélangeant des peintures de différentes couleurs. Elle est en fait constituée d’ondes électromagnétiques.

Il sera utile ici de dire quelques mots sur les ondes, avant de parler de la lumière. Tout le monde connaît les ondes à la surface de l’eau, qu’il s’agisse de vagues sur l’océan ou de vaguelettes à la surface d’une mare lorsqu’on laisse tomber une petite pierre dans l’eau, ou encore lorsqu’il se met à pleuvoir (voir la figure 6). Mais il y a aussi des ondes dans l’air, des ondes sonores. Dans les deux cas, il y a des mouvements oscillatoires de la matière et un transfert d’énergie. Je m’explique.

Considérez d’abord une vaguelette sur la surface de l’eau. Regardez une petite feuille quand la vaguelette passe. L’eau soulève la feuille et puis la repose où elle était avant. La vaguelette ne fait pas avancer la feuille. C’est parce que l’eau dans la vaguelette n’avance pas non plus. La seule chose qui avance est l’énergie, pour soulever une autre feuille un peu plus loin. On connaît cette même expérience quand on nage dans la mer. Les vagues nous soulèvent et puis nous reposent, sauf si elles sont en train de trébucher sur le sable de la plage.

Pensez aussi au son quand je vous parle. Je fais vibrer l’air avec mes cordes vocales et les molécules d’air se déplacent sur des petits cycles très courts. Cet

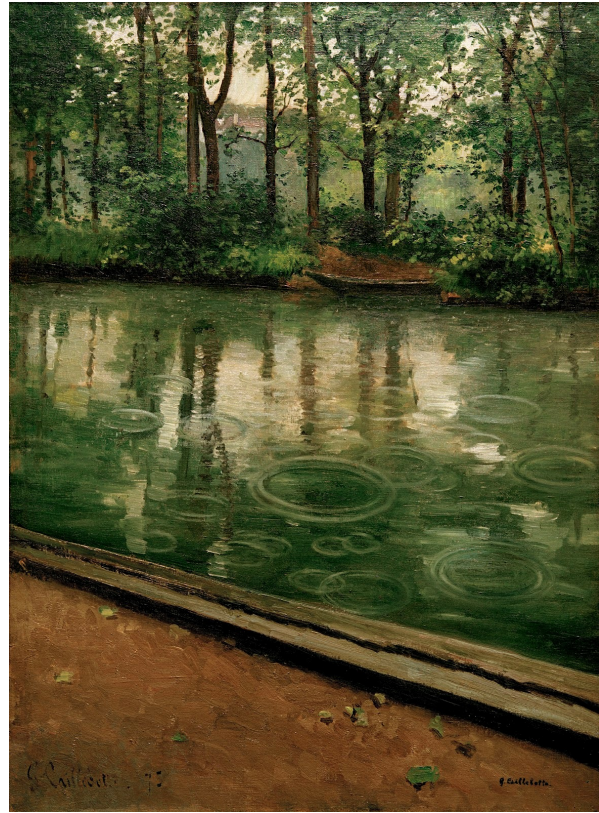


FIGURE 6 – Vagues à la surface de l'eau, peintes par Gustave Caillebotte en 1875. Le tableau s'appelle *L'Yerres, pluie*. Image : Sidney and Lois Eskenazi Museum of Art Provenance Project, CC BY-SA 3.0

effet se transfère d'une molécule à la prochaine dans toutes les directions, et en particulier jusqu'à votre oreille. Mais ce n'est pas l'air qui est transféré de ma bouche jusqu'à votre oreille, seulement la vibration, c'est à dire seulement l'énergie. Donc encore une fois, il s'agit de mouvements oscillatoires de matière et transfert d'énergie.

Regardez de plus près la figure 6. Caillebotte a observé un phénomène ondulatoire important : lorsque deux vagues se rencontrent, elles se superposent un instant, puis continuent comme si de rien n'était. C'est parce que seule l'énergie est transférée. Regardez les fronts d'ondes circulaires dans le tableau. Au moment où ils se superposent, ils interfèrent selon des schémas bien connus. De nombreux phénomènes ondulatoires peuvent être illustrés par des vagues d'eau dans un réservoir spécialement conçu, utilisant différents objets pour générer les vagues et les faisant interférer, ou interférer avec des objets solides sur leur chemin, comme une barrière contenant une fente, ou contenant deux fentes.

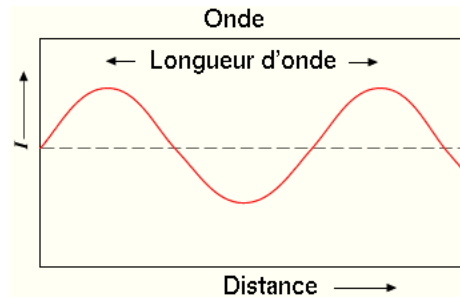


FIGURE 7 – Définition de la longueur d'onde

Les étudiants en mécanique quantique reconnaîtront l'importance de ce type d'expérience.

Il existe un certain jargon pour parler des ondes. D'abord la longueur d'onde, illustrée sur la figure 7, qui est la distance entre deux sommets, où bien entre deux vallées, c'est pareil. La longueur d'onde est généralement notée par la lettre grecque λ (prononcée 'lambda'). L'unité physique pour cette grandeur est n'importe laquelle unité de longueur, comme le nanomètre ou le mètre, par exemple. On parle aussi de la fréquence, notée par la lettre grecque ν (prononcée 'nu'), qui est le nombre d'oscillations de l'onde à un endroit donné chaque seconde, par exemple, le nombre de fois par seconde que la feuille à la surface de l'eau dans la mare est soulevée, baissée, et ramenée à sa position de départ. L'unité physique de cette grandeur est le hertz (Hz). Si une onde oscille dix fois par seconde, elle a une fréquence de 10 Hz. Avec ces symboles, une petite réflexion montre que la vitesse de transfert v de l'énergie par l'onde est le produit de la longueur d'onde et la fréquence, c'est à dire $v = \nu\lambda$.

Revenons à la lumière. Il se trouve que la lumière peut être considérée comme une onde. La lumière visible, celle qui peut être détectée par nos yeux, a des longueurs d'onde extrêmement courtes, dans la gamme 390 à 750 nm, où

$$1 \text{ nm} = 1 \text{ nanomètre} = 10^{-9} \text{ m},$$

ou un milliardième de mètre. Par contre, elle a des fréquences très élevées, dans la gamme 430 à 770 THz, où

$$1 \text{ THz} = 1 \text{ terahertz} = 10^{12} \text{ Hz},$$

ou mille milliards de hertz. Ça fait donc des longueurs d'onde seulement quelques milliers de fois plus grandes qu'un atome, et quelques centaines de milliers de milliards de cycles par seconde! Parmi toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, c'est la lumière rouge qui a l'onde la plus longue et la fréquence la plus basse, alors que la lumière violette a l'onde la plus courte et la fréquence la plus élevée.

J'avais dit tout à l'heure que la lumière est faite d'ondes électromagnétiques. Mais c'est quoi une onde électromagnétique? C'est une onde de quoi? Une des choses les plus frappantes par rapport à la lumière est le fait qu'elle peut

traverser le vide. On le sait bien, parce qu'on voit les étoiles, le Soleil, et la Lune! Ceci n'est pas le cas pour les ondes sur l'eau, qui ont vraiment besoin de l'eau pour exister, et les ondes de son dans l'air, qui ont vraiment besoin de l'air pour se transférer.

Je me rappelle d'une merveilleuse expérience que nous avons fait à l'école. Nous avons mis une cloche . . . sous une cloche, c'est à dire une cloche en verre, hermétiquement scellé. Quand il y a de l'air sous la cloche (en verre) et on secoue le tout, on entend bien la cloche qui sonne, et bien sûr on le voit aussi. Le son et la lumière arrivent donc à sortir. Mais quand on extrait tout l'air de la cloche en verre et on secoue l'ensemble, on n'entend plus la cloche qui sonne, alors qu'on le voit bien bouger! Notez que le son peut passer dans l'eau, et dans des solides aussi, mais il a vraiment besoin d'un milieu pour passer, à la grande différence de la lumière.

Pendant un temps on pensait qu'il y avait bien un milieu qui supportait les ondes de la lumière. On l'avait appelé *éther*, mais on n'a jamais pu en trouver trace! On peut néanmoins comprendre ce que c'est une onde de lumière si on accepte la notion de champs de force. Car l'électricité et le magnétisme s'opèrent tous deux à travers des champs de force qui sont tout à fait capables d'atteindre d'objets réceptifs à travers le vide.

Par exemple, l'électron est une particule qui porte une charge électrique, et on considère que cette charge produit un champs de force autour de la particule. Cela veut dire précisément que, quand une autre particule qui porte une charge électrique s'approche, un autre électron, par exemple, elle ressent une force électrique grâce à ce champs de force. Quand le premier électron est secoué, il va produire des vibrations dans ce champs de force à la même fréquence, des ondes électromagnétiques donc! En bref, la lumière est juste une vibration dans un champs de force électromagnétique!

C'est d'ailleurs James Clerk Maxwell, un physicien écossais à Cambridge, qui a finalement prouvé que la lumière était un phénomène électromagnétique vers 1870. Ses travaux théoriques, qui ont conduit à ce que l'on appelle les équations de Maxwell, ont été l'aboutissement de décennies de travaux expérimentaux remarquables sur les phénomènes électriques et magnétiques réalisés par de nombreux scientifiques. Comme d'habitude, c'est le résultat d'un formidable effort collectif que l'on ne retrouve dans aucun autre domaine de l'activité humaine que les sciences. Maxwell remarqua que ses équations avaient une solution ondulatoire qui pouvait se propager dans le vide et il fut même capable de calculer la vitesse que devaient avoir les vagues. Elle s'est avérée égale à la vitesse mesurée pour la lumière.

Le spectre électromagnétique

La figure 8 montre toutes les possibilités pour les ondes électromagnétiques. Notez que les ondes radio, les micro-ondes, les ondes infrarouge, les ultraviolets, les rayons X, et les rayons gamma sont toutes des ondes électromagnétiques, tout comme les ondes de lumière que nous détectons avec nos yeux. La partie dite 'visible' du spectre représente en effet juste une toute petite partie de ces

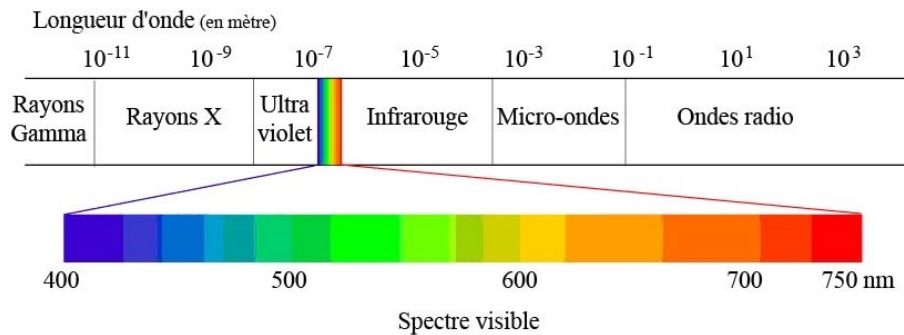


FIGURE 8 – Le spectre électromagnétique



FIGURE 9 – *Gauche* : Comment une abeille voit une fleur de pissenlit. *Droite* : Comment nous la voyons. Image : ultravioletphotography.com

possibilités. On peut se demander d'ailleurs pourquoi nos yeux ne détectent pas les autres types d'ondes électromagnétiques. Une des raisons est que notre étoile, le Soleil, émet surtout dans cette gamme, ou bien il émet dans d'autres parties du spectre mais elles sont bloquées par l'atmosphère terrestre et n'arrivent jamais dans notre environnement immédiat (voir la figure 10). Nos yeux ont évolué pour détecter les ondes électromagnétiques les plus disponibles et les plus utiles à nos ancêtres.

Notons au passage que de nombreux insectes et oiseaux peuvent détecter certaines longueurs d'onde UV avec leurs yeux. Une fleur de pissenlit leur semble différente. La figure 9 montre à droite comment nous la voyons. Les pétales sont tous uniformément jaunes. Il n'y a pas de motif. Mais justement, une abeille en verra un. Le centre de la fleur sera différent de l'extérieur. Attention cependant ! Le côté gauche est une *image en fausses couleurs*. L'abeille ne voit pas le rose au milieu et le blanc à l'extérieur, car elle détecte les UV à différentes longueurs d'onde. En d'autres termes, les pétales renvoient différentes longueurs d'onde UV au milieu et sur le bord. Les couleurs servent uniquement à nous aider

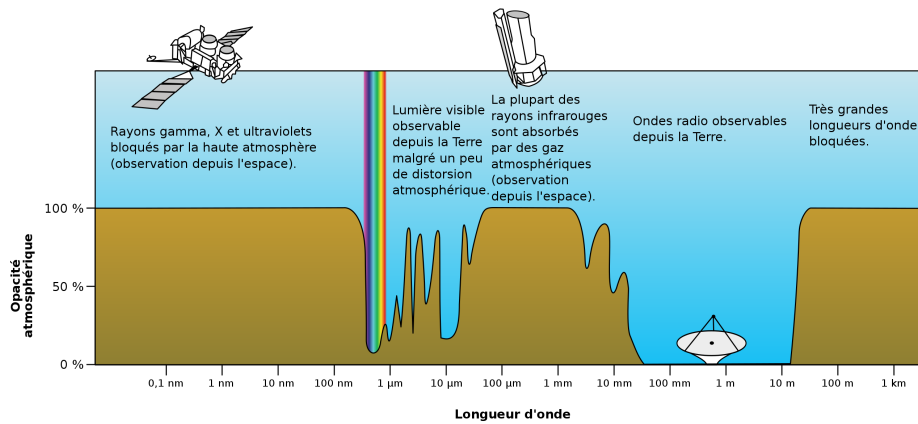


FIGURE 10 – Opacité de l’atmosphère par rapport aux différentes régions du spectre électromagnétique

à visualiser le motif. Ce qui est important, c’est qu’il y ait un motif, et pas seulement une apparence uniforme. Les images en fausses couleurs sont cruciales pour visualiser ce que les astronomes détectent dans la région non visible du spectre électromagnétique.

Il y a quelque chose d’important à comprendre ici. Les différentes ondes dans le spectre de la figure 8 ont toutes des longueurs d’onde différentes et aussi des fréquences différentes. C’est bien ça qui les caractérisent d’ailleurs. Les ondes radio sont les plus longues et elles ont les fréquences les plus basses. Les infrarouges sont un petit peu plus longues que la lumière visible, alors que les ultraviolets sont un petit peu plus courtes. Dans la partie visible du spectre, les rouges sont les plus longues et ont les fréquences les plus basses, alors que les violettes sont les plus courtes et ont les fréquences les plus élevées. Chaque couleur, ou plutôt chaque teinte de couleur, correspond à une fréquence précise et une longueur d’onde précise.

Notez en passant que la longueur d’onde d’une onde électromagnétique est inversement proportionnelle à sa fréquence. C’est bien parce que le produit des deux grandeurs est égale à la vitesse de transfert de l’énergie par ces ondes, qui est toujours la même, car c’est la vitesse de la lumière ! Et en parlant d’énergie, il y a encore une chose importante à retenir : chaque teinte de couleur, donc chaque longueur d’onde et chaque fréquence, correspond à une énergie précise. On verra dans quelques instants pourquoi c’est important.

Voici donc une idée intéressante. Supposons que des objets célestes et des phénomènes célestes produisent des ondes électromagnétiques dans d’autres parties du spectre. Si nous pouvions capter ces signaux, nous pourrions en apprendre beaucoup plus sur ce qui se passe là-haut. Et en effet, il s’avère que l’Univers nous informe sur ses activités sur l’ensemble du spectre électromagnétique. Vous voyez maintenant comment il est devenu possible, du moins en principe, d’étendre l’astronomie de l’étroite partie visible du spectre à une vaste gamme



FIGURE 11 – Réplique grandeur nature du « manège de Jansky », construite par Karl Jansky au début des années 1930 et maintenant au Green Bank Observatory, qui faisait autrefois partie du National Radio Astronomy Observatory (NRAO) à Green Bank, West Virginia. Domaine public

d'autres longueurs d'onde. Il ne restait plus qu'à trouver des moyens de détecter ces autres longueurs d'onde. C'est là qu'intervient la figure 10.

C'est essentiellement un graphique. Sur l'axe horizontal, les longueurs d'onde possibles, avec les rayons gamma à gauche, puis les rayons X, les ultraviolets (UV), la partie visible du spectre allant du violet au rouge, l'infrarouge, les micro-ondes et la radio. Sur l'axe vertical, l'opacité de l'atmosphère par rapport à chaque longueur d'onde. Regardez les rayons gamma et les rayons X. L'atmosphère leur est totalement opaque, peut-être heureusement ! Cela signifie qu'il ne sert à rien d'installer des détecteurs à la surface de la Terre. Nous devons aller dans l'espace pour voir ce que l'Univers nous dit dans ces longueurs d'onde. De même pour la plupart des UV, la plupart des infrarouges, la plupart des micro-ondes et une grande partie des ondes radio. Mais regardez bien ! Il existe une belle fenêtre atmosphérique pour les ondes radio allant de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. Ils traversent l'atmosphère comme si elle n'existait pas.

Dans ce qui suit, je passerai en revue très superficiellement les différentes manières dont nous disposons désormais pour observer l'Univers sur l'ensemble du spectre électromagnétique, en commençant par l'observation radio depuis la Terre, puis l'observation visible depuis l'espace, l'observation infrarouge depuis l'espace, l'observation des rayons X et des rayons gamma depuis l'espace, et enfin, les nouveautés dans l'observation visible depuis la Terre. Cela sera suivi d'une visite très rapide à deux formes d'astronomie beaucoup plus récentes qui ne détectent pas du tout la lumière.



FIGURE 12 – L'un des tout premiers détecteurs radio spécialement conçus pour observer les sources célestes. Il est devenu opérationnel en septembre 1937. Image : Grote Reber. Domaine public

Radioastronomie

La figure 11 montre une antenne directionnelle conçue par le jeune physicien Karl Jansky pour détecter les ondes radio à une fréquence de 20,5 MHz (une longueur d'onde d'environ 14,6 mètres). Il avait un diamètre d'environ 30 mètres et une hauteur de 6 mètres. Il était monté sur un plateau tournant sur un ensemble de quatre roues Ford Model-T afin de pouvoir tourner, d'où le surnom de « manège de Jansky ». Il aurait coûté moins de 1000 dollars américains. En faisant tourner l'antenne, la direction d'un signal reçu pouvait être localisée. Les intensités des signaux étaient enregistrées par un système automatique utilisant un stylo sur papier installé dans un petit hangar à côté de l'antenne. Comme je l'ai déjà dit, la détection est importante. Il s'agissait de signaux radio et ne pouvaient pas être détectés par nos yeux.

Jansky l'a construit pour les Bell Telephone Laboratories, un célèbre centre de recherche aux États-Unis, afin d'étudier les sources d'électricité statique susceptibles d'interférer avec les transmissions vocales radio. A cette époque, les communications à longue distance se développaient et il était important d'identifier les sources d'interférences, ou de bruit. C'est par pur hasard que Jansky a capté un signal provenant du centre de notre galaxie, la Voie lactée. Il s'agissait de la première détection d'un signal provenant de l'Univers qui ne se trouvait pas dans la partie visible du spectre électromagnétique. Imaginez la surprise.

Naturellement, l'étape suivante consistait à construire des radiotélescopes



FIGURE 13 – Le Karl Jansky Very Large Array (VLA) à Socorro, Nouveau-Mexique. CC BY-SA 3.0

spécifiquement pour capter les ondes radio de l'espace. La figure 12 montre l'un des premiers d'entre eux, construit par le pionnier de la radioastronomie Grote Reber dans son jardin à Wheaton, Illinois, en 1937. Le radiotélescope de Reber consistait en une antenne parabolique en tôle de 9 m de diamètre, focalisant à un récepteur radio situé à 8 m au-dessus de l'antenne. Cette dernière était parabolique comme le miroir du télescope de Newton, et pour la même raison : les fronts d'ondes radio provenant de sources très éloignées comme les étoiles sont plans et perpendiculaires à leur direction de mouvement. La parabole et le détecteur peuvent être inclinés de manière à pointer dans différentes directions. D'autres sources radio célestes ont en effet été observées.

Il n'est pas surprenant que la radioastronomie ait rapidement pris son essor, devenant de plus en plus sophistiquée. La figure 13 montre le Very Large Array (VLA) à Socorro, au Nouveau-Mexique. Celui-ci comprend 27 télescopes paraboliques, mesurant chacun 25 mètres de diamètre et formant un réseau interférométrique, ce qui veut dire qu'ils peuvent travailler ensemble pour observer une seule source céleste. Cela permet de détecter des sources plus faibles et donner une meilleure résolution des détails. Le VLA a été construit entre 1973 et 1980 et détecte les longueurs d'onde centimétriques. Pourquoi des longueurs d'onde centimétriques ? Le choix de la cible céleste détermine quelles longueurs d'onde seront privilégiées par un observatoire donné. Les théoriciens font des prédictions sur ce qui se passe là-haut, et les observatoires recherchent ce qui est prédit. Ils peuvent confirmer ou infirmer. La nature a le dernier mot. Et la nature réserve généralement aussi des surprises, des choses auxquelles on ne s'attendait pas.



FIGURE 14 – L’Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) dans le désert d’Atacama, au Chili. Image : Iztok Bončina/ESO, CC BY 4.0

La figure 14 montre une partie d’un autre réseau de radiotélescopes, celui-ci beaucoup plus récent. L’Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) est un interféromètre astronomique composé de 66 radiotélescopes de diamètres 12 m et 7 m. Il a été construit à une altitude de 5000 m dans le désert d’Atacama, au nord du Chili, un site choisi pour sa haute altitude et sa faible humidité. Ce sont des caractéristiques importantes lors de l’observation du rayonnement électromagnétique à des longueurs d’onde millimétriques et submillimétriques (3,6 à 0,32 mm, correspondant à 31 à 1000 GHz). L’observation a commencé en 2011. Avec un coût d’environ 1,4 milliard de dollars, il s’agit du télescope au sol le plus cher en activité actuellement. ALMA fournit des informations sur la naissance des premières étoiles de l’Univers et des images détaillées de la formation locale des étoiles et des planètes.

À noter qu’il existe de nombreux autres observatoires radio à travers le monde. Le VLA et l’ALMA ne sont donnés qu’à titre d’illustration, et je n’ai presque rien dit sur leur façon de travailler ni sur ce qu’ils ont vu. Mais si vous êtes intrigués, regardez en ligne. Il existe de nombreux sites scientifiques très fiables dédiés spécifiquement à chaque observatoire. L’ESA et la NASA disposent aussi d’informations et, comme il s’agit toujours de projets internationaux impliquant des scientifiques du monde entier, d’autres informations seront disponibles aux sites des instituts de recherche concernés.

Il convient de mentionner une autre forme de collaboration internationale. Aujourd’hui, les observations d’un objet céleste donné peuvent être effectuées à l’aide de plusieurs observatoires radio situés dans différents endroits, voire sur différents continents. C’est ce qu’on appelle l’interférométrie à très longue base (VLBI). L’interférométrie consiste à combiner des signaux. Il augmente ainsi le

signal total collecté, mais son objectif principal est d'augmenter considérablement la résolution grâce à un processus appelé synthèse d'ouverture. Cela crée une sorte de très grand télescope dont la résolution (mais pas la sensibilité) est équivalente à une antenne unique dont le diamètre est égal à l'espacement des antennes les plus éloignées du réseau.

Grâce à cette méthode, il est possible de synthétiser une antenne qui a effectivement la taille de la Terre. Les grandes distances entre les télescopes permettent d'atteindre des résolutions angulaires très élevées, bien supérieures à celles de tout autre domaine de l'astronomie. Des détails inférieurs à une microarcseconde ont été obtenus. Pour comprendre cela, notons que la Lune sous-tend un angle d'environ un demi-degré d'arc, soit trente minutes d'arc, soit 1800 secondes d'arc. On parle ici de détails plus petits qu'un millionième de seconde d'arc. C'est vraiment très précis.

Alors, quels types d'objets célestes et d'événements cosmiques produisent des signaux radio ? La réponse est que certains des processus physiques les plus extrêmes et les plus énergétiques de l'Univers nous envoient ce type d'informations sous forme de *rayonnement synchrotron*, depuis les pulsars jusqu'aux quasars, en passant par les noyaux galactiques actifs et les radiogalaxies. C'est quoi toutes ces choses ? Ce sont des sources libérant d'énormes quantités d'énergie sous diverses formes de rayonnement électromagnétique. Ils génèrent tous des champs magnétiques très puissants qui accélèrent les particules électriquement chargées à des vitesses très élevées et les font émettre un rayonnement synchrotron, nom donné au rayonnement électromagnétique émis lorsque des particules chargées sont soumises à une accélération perpendiculaire à leur vitesse. Il y a beaucoup de choses à ce sujet sur Internet, mais vous aurez besoin d'un diplôme en physique pour vraiment aller au fond des choses. Cependant, je reviendrai sur les pulsars plus tard. Et je parlerai du trou noir géant au centre galactique, qui émet également des ondes radio – en effet, ce fut la première source cosmique d'ondes radio détectée.

Mais la source d'ondes radio la plus importante pour les cosmologistes, ceux qui étudient l'évolution de l'Univers dans son ensemble, est sans aucun doute le fond diffus cosmologique (CMB), détecté pour la première fois en 1965 par les radioastronomes américains Arno Penzias et Robert Wilson. Il s'agit d'un rayonnement émis environ 380 000 ans après le Big Bang, lorsque l'Univers était rempli d'un plasma chaud de particules subatomiques. Au fur et à mesure de l'expansion de l'Univers, le plasma s'est refroidi et il est arrivé un moment où les particules chargées du plasma ont pu se combiner pour former des atomes d'hydrogène et d'hélium électriquement neutres.

Électriquement neutres, ces atomes ne pouvaient plus diffuser le rayonnement thermique, d'où l'Univers devenait transparent. C'est ce qu'on appelle l'époque de la recombinaison. Les ondes électromagnétiques ainsi soudainement libérées pouvaient désormais voyager librement dans l'espace. Et en effet, depuis lors, ils se déplacent dans l'espace, s'étendant avec l'expansion de l'espace et se déplaçant ainsi progressivement dans la région des micro-ondes du spectre électromagnétique. Cette transformation progressive de la longueur d'onde vers des valeurs plus longues est appelée décalage vers le rouge ou redshift – dans

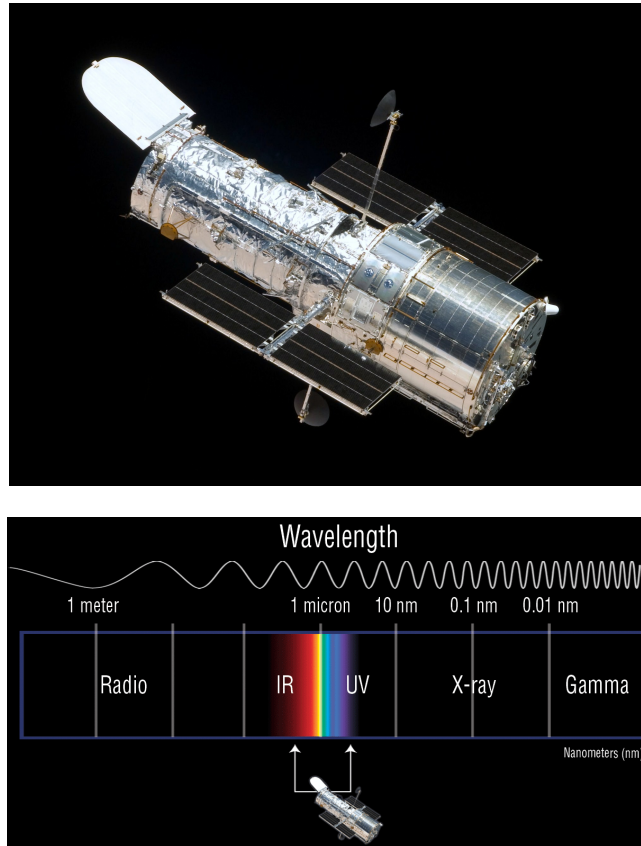


FIGURE 15 – *En haut* : Le télescope spatial Hubble en 2009, vu depuis le départ de la navette spatiale Atlantis. Image : équipage du STS-125, domaine public. *En bas* : Le télescope spatial Hubble détecte principalement la lumière visible, indiquée ici par les couleurs de l'arc-en-ciel, ainsi que certaines longueurs d'onde infrarouge et ultraviolet. Notez que l'échelle de longueur d'onde sur l'axe horizontal a été inversée par rapport aux figures 8 et 10, donc les ondes radio sont à gauche et les rayons gamma à droite. Image : NASA

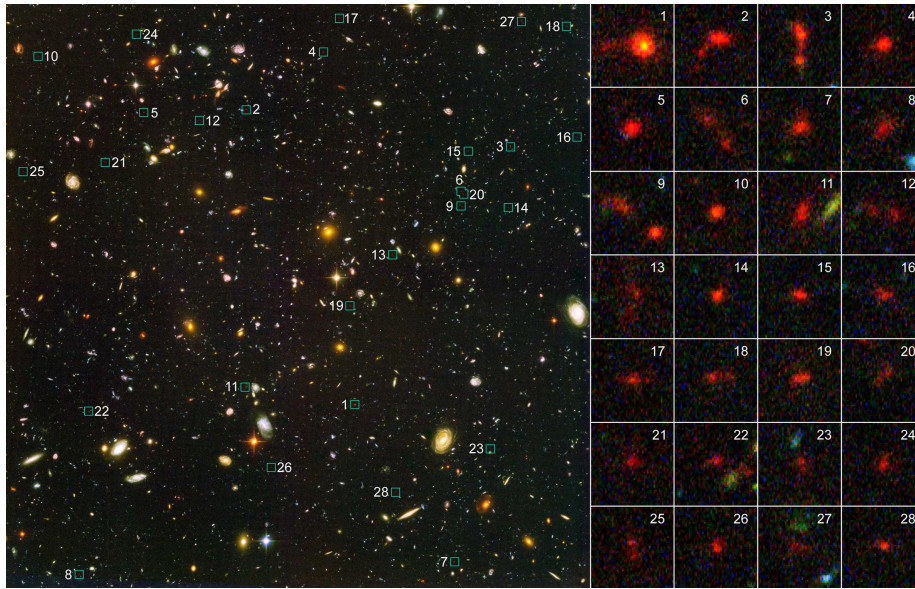


FIGURE 16 – Cette image, appelée Hubble Ultra Deep Field, montre 28 des plus de 500 jeunes galaxies qui existaient lorsque l’Univers avait moins d’un milliard d’années. Image : NASA, ESA, R. Bouwens and G. Illingworth (University of California, Santa Cruz)

ce cas-ci, redshift cosmologique – car elle déplace les couleurs visibles du bleu vers le rouge. Dans un sens, il s’agit de l’image électromagnétique de l’Univers la plus ancienne que nous puissions jamais détecter. A noter que son existence constitue une des confirmations les plus claires de la théorie du Big Bang.

Observer la lumière visible depuis l’espace

Tout le monde connaît le vaisseau spatial de la figure 15. Lancé en 1990, le télescope spatial Hubble fonctionne toujours aujourd’hui depuis son orbite autour de la Terre à une altitude de 550 km. Comme le montre la partie inférieure de la figure 15, il détecte la lumière visible, mais aussi une partie des régions infrarouges et UV qui seraient difficiles à observer depuis la surface de la Terre, car comme nous l’avons vu, ces longueurs d’onde sont absorbées par l’atmosphère.

Mais pourquoi aller dans l’espace pour observer la lumière visible quand nous savons que nous pouvons le faire d’ici ? La réponse est la turbulence. Même s’il n’y a pas de nuages, l’atmosphère n’est pas homogène. Il existe des variations locales de température et de pression sur de nombreuses échelles de longueur et de temps différentes. Cela signifie qu’il existe des variations locales dans l’indice de réfraction de l’air, de sorte qu’un rayon de lumière provenant d’une étoile continuera à changer très légèrement de direction au fur et à mesure que la pression et la température changent le long de son trajet. C’est ce qui fait

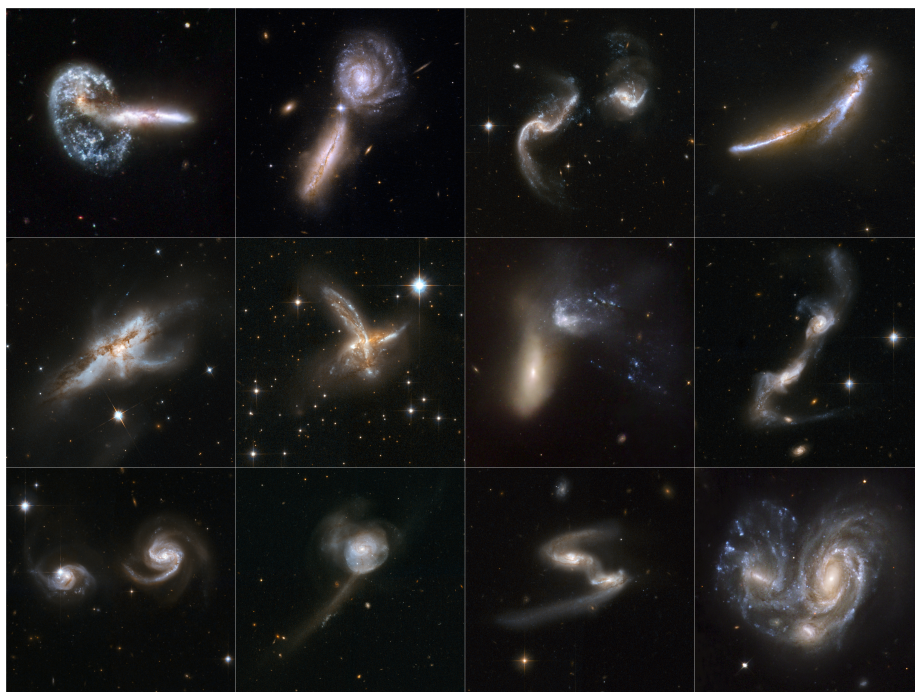


FIGURE 17 – Quelques instantanés de Hubble montrant des collisions de galaxies. Image : NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), K. Noll (STScI), and J. Westphal (Caltech)

scintiller les étoiles. Ils ne semblent jamais rester exactement sur place. Et c'est un problème si vous essayez d'imager les détails d'un objet très lointain et faible.

Juste un mot sur Edwin Hubble (1889–1953), l'astronome américain qui a donné son nom à ce télescope spatial. Il fait partie de ceux qui ont finalement réussi à prouver que bon nombre de ces objets flous dans le ciel nocturne ne se trouvaient pas dans notre propre galaxie, mais étaient elles-mêmes des galaxies, beaucoup plus éloignées. Ce fut l'une des grandes découvertes du siècle dernier : notre galaxie n'est qu'une parmi tant d'autres que compte l'Univers.

La figure 16 montre un exemple du travail effectué par le télescope spatial Hubble. Il s'agit d'une longue exposition d'une minuscule région de la sphère céleste montrant des galaxies très faibles, donc très lointaines, donc très anciennes, en fait certaines des plus anciennes que nous connaissions. Il y a ici vingt-huit galaxies, repérées par les carrés verts, qui se sont formées moins d'un milliard d'années après le Big Bang, soit il y a plus de 12,8 milliards d'années. Naturellement, nous n'avons aucune idée de ce à quoi elles ressemblent aujourd'hui, mais il est certainement intéressant pour les cosmologistes de voir à quoi

ressemblaient ces premières galaxies à l'époque.

Regardez aussi les images de galaxies en collision sur la figure 17. Les galaxies ont tendance à se regrouper, tournant les unes autour des autres, ou plutôt autour de leur centre de gravité commun. Mais parfois, ils se rapprochent trop et entrent en collision. La belle galaxie d'Andromède sur la figure 1 est en route vers nous. Même à une vitesse relative phénoménale de 120 km/s, cela prendra environ 4,6 milliards d'années.

Observer la lumière infrarouge depuis l'espace

Le télescope spatial Hubble n'est pas le seul observatoire spatial capable d'imager la lumière visible. Mais jetons un coup d'œil à une autre partie du spectre électromagnétique. Ici, nous décrivons brièvement deux observatoires spatiaux observant dans les longueurs d'onde infrarouges.

La figure 18 montre le télescope spatial Spitzer de la NASA. Il a été lancé en 2003 et a continué à fonctionner jusqu'en 2020, bien après la fin prévue de la mission, même si l'observation a été quelque peu limitée par des problèmes techniques dans les phases finales. Il a observé dans l'infrarouge proche et moyen, notamment aux longueurs d'onde de 3 à 8 microns et de 5 à 40 microns, selon les instruments utilisés pour la détection, et également dans l'infrarouge lointain, aux longueurs d'onde de 5 à 40 microns. Un micron équivaut à un millionième de mètre. Notez l'importance d'avoir des détecteurs pour différentes longueurs d'onde. Ceux-ci doivent être développés en utilisant la physique théorique et la science des matériaux. La détection est évidemment un enjeu clé dans l'extension de l'astronomie à d'autres régions du spectre électromagnétique.

La plupart des détecteurs et autres équipements doivent être refroidis avec de l'hélium liquide à des températures très basses. En effet, tout ce qui est chaud émet une lumière infrarouge, de sorte qu'un télescope chaud, même tiède, pourrait finir par submerger les signaux souvent faibles qu'il souhaite capter depuis l'espace. Le télescope a été placé sur une orbite qui suit la Terre dans son orbite autour du Soleil. Il a pu observer les premières étapes de l'Univers, notamment la formation et l'évolution des premières galaxies, mais aussi la genèse des étoiles et des planètes, toutes principalement visibles dans la partie infrarouge du spectre.

Qu'a-t-on vu avec cet observatoire spatial ? La figure 19 montre un exemple dans notre système solaire. La poussière a tendance à diffuser la lumière infrarouge. La plupart des gens ne veulent pas voir de la poussière, mais les astronomes adorent ça. Il y en a beaucoup dans l'espace, rarement très dense, mais quand même beaucoup quand on réalise l'ampleur des espaces vides. Et cela joue un rôle clé dans l'évolution d'objets comme les étoiles et les galaxies. Autour de Saturne, elle s'est rassemblée en anneaux sous l'effet combiné de la gravité et de la rotation, un phénomène physique intéressant en soi.

La figure 20 montre deux vues de la nébuleuse de l'Hélice. Il s'agit d'un objet situé dans notre galaxie, à environ 700 années-lumière, dans la constellation du Verseau. C'est un bel exemple de ce qu'on appelle une nébuleuse planétaire. C'est un terme inapproprié, car il n'y a pas de lien avec des planètes. Ce sont



FIGURE 18 – Le Space Infrared Telescope Facility (SIRTF), également connue sous le nom de télescope spatial Spitzer. Notez le soin apporté à la protection contre la poussière. Domaine public

les restes d'une étoile qui a atteint la fin de sa vie. Notre propre étoile, le Soleil, produira une telle nébuleuse dans quatre ou cinq milliards d'années, soufflant progressivement ses couches externes pour produire une vaste sphère de matière brillante avec une étoile naine blanche au milieu. La naine blanche est en fait le noyau de l'étoile dans ses phases finales. La nébuleuse Hélix mesure aujourd'hui environ 5,74 années-lumière de diamètre, ce qui suggère qu'elle est en expansion depuis plusieurs milliers d'années.

La figure 20 (gauche) a été réalisée par Spitzer. Voici la description du site hébergé à Caltech [1] :

La lumière infrarouge provenant des couches gazeuses externes est représentée en bleu et en vert. La naine blanche est visible sous la forme d'un petit point blanc au centre de l'image. La couleur rouge au milieu de l'œil désigne les dernières couches de gaz expulsées lors de la mort de l'étoile. [...] Le cercle rouge plus brillant au centre est la lueur d'un disque poussiéreux entourant la naine blanche (le disque lui-même est trop petit pour être résolu). Cette poussière, découverte grâce à la vision infrarouge à recherche de chaleur de Spitzer, a très probablement été soulevée par des comètes qui ont

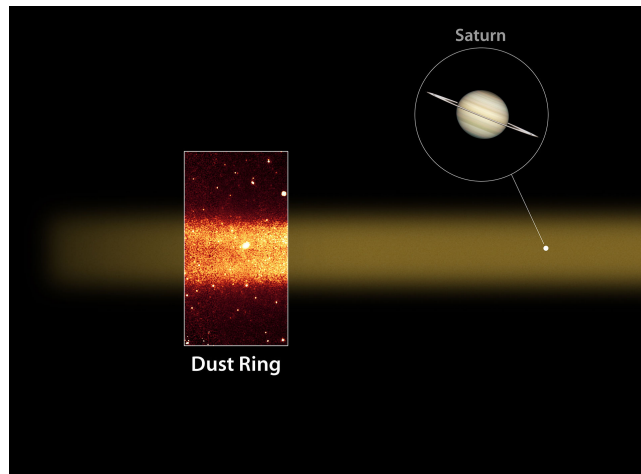


FIGURE 19 – Le télescope spatial Spitzer a découvert un anneau de poussière jusqu’alors inobservé autour de Saturne. Image : NASA/JPL-Caltech/University of Virginia

survécu à la mort de leur étoile. Avant la mort de l’étoile, ses comètes et éventuellement ses planètes auraient tourné autour de l’étoile de manière ordonnée. Mais lorsque l’étoile a fait exploser ses couches externes, les corps glacés et les planètes extérieures auraient été projetés les uns dans les autres, entraînant une tempête de poussière cosmique sans fin. Toutes les planètes intérieures du système auraient brûlé ou été englouties au fur et à mesure de l’expansion de leur étoile mourante.

Alors que le Soleil entre dans son agonie, le sort de la Terre reste une question ouverte, mais cela n’augure rien de bon. Tout dépend si elle est suffisamment éloignée du Soleil pour échapper à une destruction totale. Il suffit de dire que ce qui reste deviendra un autre bel objet cosmique.

La figure 20 (droite) est une vue composite de la même nébuleuse de l’Hélice mélangeant des images du télescope spatial Hubble et de l’observatoire de Kitt Peak en Arizona dans la partie visible du spectre. La lumière à différentes longueurs d’onde nous renseigne sur différents phénomènes physiques se produisant dans la nébuleuse. Le but est d’expliquer tout ce que nous voyons sur la base de nos théories fondamentales de la lumière et de la matière. Depuis 1920, nous avons parcouru un long chemin. Il y a cent ans, nous ne savions même pas si c’était une planète, ni si elle se trouvait dans notre galaxie.

Passons à un deuxième observatoire infrarouge dans l’espace, beaucoup plus récent. La figure 21 montre la préparation du télescope spatial James Webb, l’une des plus belles prouesses technologiques jamais réalisées par l’humanité. Il porte le nom de James E. Webb, qui fut l’administrateur de la NASA de 1961 à 1968 lors des programmes Mercury, Gemini et Apollo, et qui a mis

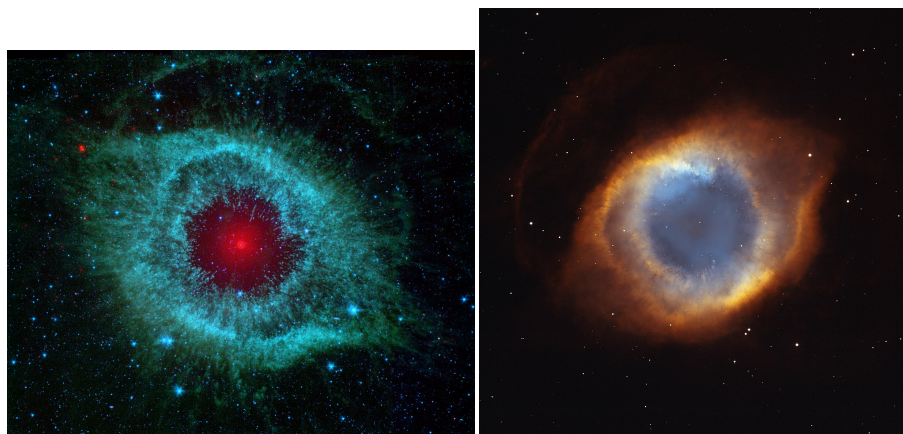


FIGURE 20 – Deux vues de la nébuleuse de l’Hélice. *Gauche* : image en fausses couleurs de Spitzer. Image : NASA/JPL-Caltech/K. Su (Université de l’Arizona). *Droite* : un mélange homogène de neuf images ultra-nettes de la Advanced Camera for Surveys du télescope spatial Hubble avec la vue grand champ de la Mosaic Camera du télescope WIYN de 0,9 mètre de l’observatoire national de Kitt Peak. Image : NASA, NOAO, ESA, the Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), and T.A. Rector (NRAO)

en œuvre l’intégration raciale au sein de l’agence spatiale. Bien qu’il s’agisse théoriquement d’un projet de la NASA, c’était comme toujours une collaboration internationale, avec l’Agence spatiale européenne (ESA) et l’Agence spatiale canadienne (ASC), ainsi que de nombreux autres organismes de recherche. La science est toujours un effort collectif.

JWST a été lancé le 25 décembre 2021 et il est arrivé à destination en janvier 2022 près du point de Lagrange Soleil-Terre L2, à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre (voir la figure 22). A titre de comparaison, la Terre est à environ 150 millions de kilomètres du Soleil. Le télescope est sur ce qu’on appelle une orbite de halo autour de L2. Un point de Lagrange est une sorte de point d’équilibre gravitationnel dans l’espace. Il n’y a rien à un tel point, mais c’est un bon endroit pour installer quelque chose comme un télescope spatial car il y a des orbites stables autour de ces points. La figure 22 montre les cinq points de Lagrange. Le télescope tourne autour du Soleil avec la Terre, mais à 1,5 million de kilomètres de nous. Par ailleurs, les trois points de Lagrange colinéaires L1, L2 et L3 ont été découverts vers 1750 par le mathématicien suisse Leonhard Euler, et les deux autres en 1772 par l’Italien Joseph-Louis Lagrange, naturalisé français en 1802.

Réfléchissez un instant à ce qu’implique le fait de placer les 6500 kg de ce télescope en orbite si loin. Et non seulement. Notez l’immense miroir dans la figure 21. Il n’y aurait aucun moyen de lancer ça depuis la surface de la Terre s’il était déployé. Les forces nécessaires pour éloigner une fusée de la Terre sont



FIGURE 21 – Le télescope spatial James Webb, lancé le jour de Noël 2021.
Image : NASA

énormes. Le miroir devait être replié, tout comme d'autres éléments de l'appareil, comme son pare-soleil. Ces éléments étaient donc déployés automatiquement lorsque le télescope arrivait à destination. Il existe une animation sur le site [2] montrant la séquence complète du déploiement. Comparez avec le télescope spatial Hubble, qui a été entretenu par la navette spatiale sur son orbite autour de la Terre à une altitude de seulement 550 km.

Le miroir principal de Webb est un réflecteur en béryllium recouvert d'or. Il a un diamètre de 6,5 m et une surface de collecte de lumière de 25,4 m². Le revêtement doré fournit une réflectivité infrarouge et est recouvert d'une fine couche de verre pour plus de durabilité. N'oubliez pas qu'il ne s'agit pas d'un miroir normal pour la lumière visible, car il doit également focaliser la lumière infrarouge. Les dix-huit pièces hexagonales doivent être réajustées régulièrement. Il y a des contraintes et des déformations dans une structure aussi grande, et la précision est essentielle. Le télescope Webb utilise 132 petits moteurs pour positionner et ajuster l'optique. Le miroir peut être positionné avec une précision de 10 nanomètres, soit seulement un cent millionième de mètre. Pour effectuer des observations dans le spectre infrarouge, Webb doit être maintenu en dessous de 50 K, soit $-223,2^{\circ}\text{C}$, sinon le rayonnement infrarouge du télescope lui-même submergerait ses instruments.

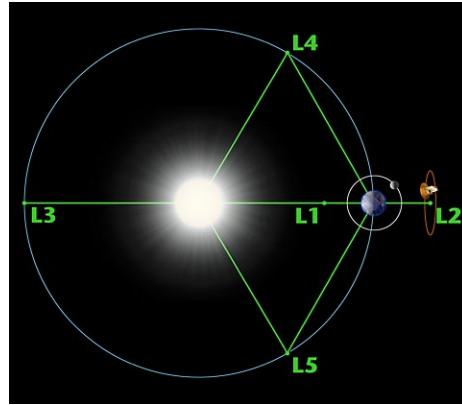


FIGURE 22 – L’orbite du JWST autour du point de Lagrange Soleil-Terre L2.
Image : NASA

Le JWST a publié sa première image le 11 juillet 2022, après environ cinq mois de mise en service. Alors, que peut voir exactement le JWST ? Il dispose de détecteurs capables de capter la lumière dans l’infrarouge moyen et proche, mais aussi la lumière visible rouge et orange. Il peut détecter des objets jusqu’à cent fois moins brillants que ceux accessibles à Hubble, et des objets bien plus anciens dans l’histoire de l’Univers. Il devrait être capable de détecter certaines des premières étoiles, qui se seraient formées seulement 120 à 180 millions d’années après le Big Bang, soit il y a bien plus de 13,6 milliards d’années, ainsi que les premières galaxies, qui se seraient formées environ 270 millions d’années après le Big Bang.

C’est l’une des principales raisons pour lesquelles le JWST est conçu pour détecter l’infrarouge. La lumière visible provenant d’une étoile ou d’une galaxie primitive aura subi le redshift cosmologique mentionné précédemment, ses ondes s’étendant avec l’expansion de l’espace alors qu’elles traversent de vastes distances pour nous atteindre aujourd’hui. La lumière visible provenant des premières sources pourrait désormais être de la lumière infrarouge, au moment où nous parviendrons à la détecter avec le JWST, des milliards d’années après son émission.

Mais il existe d’autres raisons pour lesquelles le JWST a été conçu pour détecter les infrarouges. La première est que la lumière infrarouge traverse les nuages de poussière plus facilement que la lumière visible, simplement en raison de ses longueurs d’onde plus longues, ce qui est utile lorsque vous essayez de voir des choses très loin. Même si les nuages de poussière dans l’espace sont rarement très denses, on regard souvent à travers beaucoup d’espace. Et le JWST a d’autres cibles qui émettent principalement dans l’infrarouge, comme des disques de poussière et de débris autour des étoiles où des planètes peuvent se former ou se sont déjà formées. Et enfin, l’intérêt de placer un tel télescope dans l’espace réside aussi dans le fait que la lumière infrarouge est largement



FIGURE 23 – Image par JWST d’Abell 2744, surnommée l’amas de Pandore. Image : SCIENCE : NASA, ESA, CSA, I. Labbe (Swinburne), R. Bezanson (University of Pittsburgh). Traitement d’image : A. Pagan (STScI). CC BY-SA 4.0

bloquée par notre atmosphère.

La figure 23 montre l’amas de Pandore, qui est en réalité le résultat d’une collision simultanée entre au moins quatre amas de galaxies distincts et plus petits qui s’est produite sur une période de 350 millions d’années et est située à environ 4 milliards d’années-lumière de la Terre. Pourquoi il s’appelle l’amas de Pandore ? Parce que tant de phénomènes différents et étranges ont été déclenchés par la collision. L’image est une composition d’expositions distinctes acquises par le télescope spatial James Webb. Plusieurs filtres ont été utilisés pour échantillonner des plages de longueurs d’onde spécifiques, représentées ici en fausses couleurs (rappelez-vous la figure 9).

On peut montrer que les galaxies visibles de l’amas représentent moins de cinq pour cent de sa masse. Mais il y a aussi beaucoup de gaz invisible, constituant environ vingt pour cent de sa masse. Vous vous demandez peut-être comment nous savons qu’il y a du gaz s’il est invisible. La réponse est que lorsqu’un gaz est chauffé à plus d’un million de degrés, il brille sous forme de rayons X, de sorte que nous pouvons « voir » le gaz si nous l’observons avec un télescope à rayons X. Je présenterai quelques observatoires spatiaux à rayons X dans un instant. Mais fondamentalement, dans le cas présent, nous pouvons conclure que la matière noire, quelle qu’elle soit, représente environ soixante-quinze pour cent de la masse de l’amas de Pandore.

La figure 24 montre les rayons brillants et poussiéreux reliant les anneaux intérieurs et extérieurs de la Roue de chariot, à 489,2 millions



FIGURE 24 – La galaxie de la Roue de chariot, également connue sous le nom de ESO 350-40 ou PGC 2248. Image : NASA, ESA, CSA, STScI, domaine public

d'années-lumière. Deux galaxies voisines apparaissent bien en évidence à sa gauche. Ceci est présenté ici pour la beauté de l'image, mais notez que nous savons aujourd'hui que la structure compliquée de cette galaxie résulte d'une collision avec une galaxie plus petite. Il existe de nombreuses informations à ce sujet sur le site [3], avec des références aux recherches pertinentes.

Observer les rayons X et les rayons gamma depuis l'espace

Revenez à la figure 10 à la p. 11. On y constatait que les rayons X et gamma venus de l'espace sont totalement bloqués par l'atmosphère. C'est plutôt une chance, car il existe bel et bien des sources cosmiques de ce rayonnement à haute énergie. Avant de donner un exemple, je dois expliquer pourquoi nous parlons ici d'énergie. Et pourquoi parle-t-on d'astrophysique des hautes énergies lorsque l'on étudie les sources de rayons X et gamma. En effet, ce type de rayonnement électromagnétique a tendance à se comporter davantage comme une particule que comme une onde. Bien entendu, la particule de lumière est le photon. En ces termes, l'astronomie des rayons X concerne les photons dont les énergies sont comprises entre 100 eV et 100 keV, et l'astronomie des rayons gamma concerne toute énergie supérieure à 100 keV.

Encore faut-il mettre cela en perspective. Quelle est cette unité eV ? Les détails n'ont pas d'importance, mais il s'agit de l'énergie qu'obtiendrait un électron s'il était accéléré depuis le repos entre des bornes d'une tension d'un volt. C'est ce qu'on appelle l'électronvolt. L'imagerie médicale utilise des photons X avec des énergies d'environ 60 keV, soit soixante mille électronvolts. Cela peut sembler beaucoup d'énergie, mais ce n'est pas le cas. Un électronvolt équivaut à environ 10^{-19} joule, soit un dixième de milliardième de milliardième de joule, et il faut 4,18 joule pour élever la température d'un gramme d'eau d'un degré Celsius. Cependant, ces petites quantités d'énergie représentent en-

core *beaucoup pour une chose aussi petite qu'un photon*, et les photons gamma sont dangereux pour les molécules de nos cellules. Nous devrions donc être heureux qu'il y ait une atmosphère autour de notre planète pour nous protéger.

Avant d'examiner trois exemples de télescopes à rayons X et gamma, de quels types d'objets cosmiques parlons-nous ? Quels types d'événements cosmiques produisent ces photons à haute énergie ? Comme on pouvait s'y attendre, il s'agit souvent des processus physiques les plus violents et les plus énergétiques de l'Univers. L'observation de ces photons nous permet de créer des modèles théoriques de choses comme les supernovas, les trous noirs supermassifs, les sursauts gamma et les pulsars. Alors jetons un coup d'œil rapide à ces choses exotiques.

Premièrement, les supernovas. Les grandes étoiles explosent à la fin de leur vie. Notre étoile, le Soleil, est trop petite pour se transformer en supernova. Une étoile devrait commencer sa vie avec une masse au moins huit fois supérieure à celle du Soleil pour produire une explosion aussi spectaculaire. Les étoiles sont alimentées par l'effondrement gravitationnel de la matière qu'elles contiennent. Cela crée dans leur noyau des conditions de température et de pression suffisantes pour déclencher et entretenir des réactions nucléaires. Ces réactions produisent de la chaleur et de la pression, ce qui permet à l'étoile de résister à l'effondrement pendant un certain temps. Cependant, plus une étoile est massive, plus elle brûle rapidement son combustible nucléaire, même s'il y en a plus à brûler. Cela est précisément dû aux températures et aux pressions plus élevées créées par les forces gravitationnelles plus importantes. C'est pourquoi les étoiles plus massives ont une durée de vie plus courte.

Naturellement, le combustible nucléaire d'une étoile finira par s'épuiser. À ce stade, il n'y a pas de nouvelle source d'énergie dans l'étoile pour résister à l'effondrement gravitationnel, et elle va donc effectivement commencer à s'effondrer. La matière qui s'effondre tombe à grande vitesse et heurte le noyau dur de l'étoile, avant de rebondir à des vitesses phénoménales. Il va sans dire que les détails sont extrêmement complexes, mais nous en savons déjà beaucoup grâce à la théorie et à l'observation. Ce que je viens de décrire n'est qu'un type de supernova, connu sous le nom de « type II ». Je ne parlerai pas des autres types ici, mais jetez un œil à [4] pour un bon aperçu. Par ailleurs, des étoiles moins massives comme la nôtre finiront dans ce qu'on appelle des nébuleuses planétaires, comme celle représentée sur la figure 20.

Pour les étoiles les plus massives, ce qui reste après le rebond est un objet très compact. Il existe essentiellement deux possibilités, selon la densité de l'objet : une étoile à neutrons ou un trou noir. La différence est une question de densité. Comme mentionné précédemment, le noyau du Soleil ne deviendra jamais aussi dense. Elle deviendra une naine blanche, qui est déjà un objet incroyablement dense. Une naine blanche contient une masse comparable à la masse du Soleil dans un volume généralement un million de fois inférieur au volume du Soleil. La densité moyenne de matière dans une naine blanche est donc de l'ordre d'un million de fois supérieure à la densité moyenne du Soleil, soit environ une tonne métrique par centimètre cube. Pas quelque chose à laisser tomber sur le pied.

Vous vous demandez peut-être ce qui empêche la naine blanche de s'effondrer

davantage en raison des forces gravitationnelles qu'elle exerce sur elle-même. Il s'agit en fait d'un effet quantique appelé dégénérescence électronique. Vous aurez besoin d'un diplôme en physique pour le comprendre, mais ne vous inquiétez pas, car il est peu probable que vous rencontriez de matière soumise à cette pression dans votre routine quotidienne. S'il n'y a pas assez de matière dans l'étoile, donc pas assez de force gravitationnelle, la pression de dégénérescence des électrons peut suffire à arrêter l'effondrement.

Mais s'il y a suffisamment de matière, l'effondrement peut se poursuivre jusqu'à ce que deux autres effets quantiques interviennent. Lorsque les densités atteignent une densité nucléaire de 4×10^{17} kg/m³, soit quatre cents millions de milliards de kilos par mètre cube, la densité d'un noyau atomique, une combinaison de la répulsion de la force forte¹ et la pression de dégénérescence des neutrons arrêtera la contraction [5].

À l'exception des trous noirs, les étoiles à neutrons constituent la classe d'objets stellaires la plus petite et la plus dense connue. Les étoiles à neutrons ont un rayon de l'ordre de 10 kilomètres et une masse d'environ 1,4 fois la masse du Soleil. Ainsi, la matière des étoiles à neutrons est remarquablement dense : une boîte d'allumettes contenant de la matière des étoiles à neutrons aurait une masse d'environ trois milliards de tonnes. Notez aussi qu'à mesure que le noyau d'une étoile s'effondre, sa vitesse de rotation augmente en raison de ce qu'on appelle la conservation du moment cinétique. Cela signifie que les étoiles à neutrons nouvellement formées tournent jusqu'à plusieurs centaines de fois par seconde. Ils possèdent également un champ magnétique très intense. C'est ce qui nous donne parfois un pulsar [5] :

Certaines étoiles à neutrons émettent des faisceaux de rayonnement électromagnétique qui les rendent détectables en tant que pulsars, et la découverte des pulsars par Jocelyn Bell Burnell et Antony Hewish en 1967 a été la première suggestion observationnelle de l'existence d'étoiles à neutrons. L'étoile à neutrons la plus rapide connue est PSR J1748-2446ad, tournant à une vitesse de 716 fois par seconde [6] ou 43 000 tours par minute, donnant une vitesse linéaire (tangentielle) à la surface de l'ordre de [...] près d'un quart de la vitesse de la lumière.

En un mot, un pulsar est une étoile à neutrons en rotation hautement magnétisée qui émet des faisceaux de rayonnement électromagnétique à partir de ses pôles magnétiques. Ce sont en effet des objets fascinants à étudier.

Mais maintenant, que se passe-t-il s'il y a suffisamment de matière, et donc assez de force gravitationnelle, pour écraser encore plus le noyau stellaire, surmontant ainsi la forte répulsion de la force forte et la dégénérescence des neutrons ? Si on laisse la gravité continuer, la matière pourrait éventuellement « devenir un trou noir ». Cela signifie que toute lumière qu'il émet sera incapable de s'échapper, et en effet, tout ce qui est trop proche ne pourra plus s'en éloigner.

1. La force forte est une des quatre forces fondamentales de la nature. C'est la force entre les quarks qui constituent les neutrons et les protons dans le noyau d'un atome.

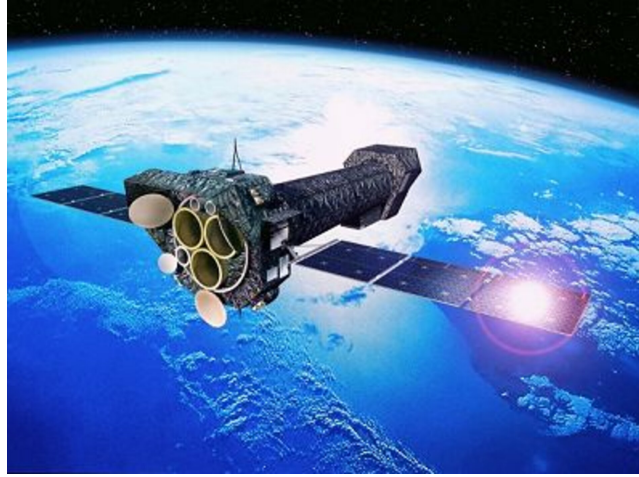


FIGURE 25 – Vue d’artiste de l’observatoire à rayons X mous XMM-Newton de l’ESA. Notez les panneaux solaires habituels, qui fournissent de l’énergie pour pointer le télescope vers ses cibles, faire fonctionner l’ordinateur de bord et renvoyer les données vers la Terre. Image : European Space Agency

Plus précisément, pour une masse de matière donnée, il existe une longueur correspondante R_S appelée le rayon de Schwarzschild, entièrement déterminée par cette masse selon une formule simple. Ensuite, il y a une sphère de ce rayon R_S , contenant la matière, qui représente le point de non-retour : si vous entrez à l’intérieur de la sphère, vous ne pourrez jamais en sortir. Même la lumière ne peut pas s’échapper de cette sphère. La surface de la sphère s’appelle l’horizon du trou noir. En bref, nous nous attendons à ce que certaines supernovas laissent un trou noir au sein de leurs restes explosifs. Mais ce n’est pas la seule façon dont un trou noir peut se former. Il en existe des trous noirs bien plus massifs dans les centres galactiques, appelés trous noirs supermassifs, comme nous le verrons plus tard. Cela a été démontré très récemment.

Vous connaissez maintenant certaines des choses qui peuvent émettre des photons à haute énergie, mais j’ai également mentionné les sursauts gamma. Ces phénomènes ont longtemps été un mystère, mais nous commençons maintenant à comprendre leurs causes. Les sursauts relativement longs sont dus à l’effondrement gravitationnel d’étoiles géantes, conduisant à la formation d’un trou noir ou d’une étoile à neutrons, tandis que les plus courts sont provoqués par la fusion de deux étoiles à neutrons dans ce que l’on appelle aujourd’hui une kilonova. Plus à ce sujet plus tard.

Revenons à l’astronomie des rayons X et gamma. La figure 25 montre l’observatoire spatial XMM-Newton. XMM est la forme abrégée de ‘X-ray multi-mirror’. Il est conçu pour focaliser et détecter les rayons X mous, c’est-à-dire avec des énergies relativement faibles, comprises entre 0,1 et 12 keV. Il s’agit des photons de plus haute énergie (longueurs d’onde les plus courtes) qui peuvent

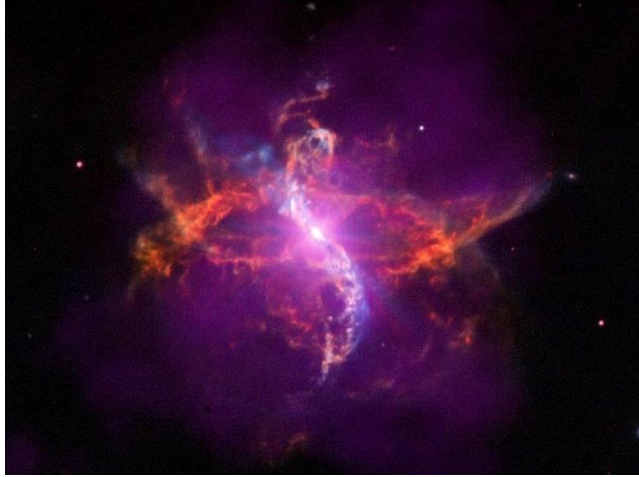


FIGURE 26 – R Aquarii est une étoile naine blanche tournant autour d’une étoile relativement froide, au centre d’une immense nébuleuse créée par la matière accumulée de l’étoile froide par la naine blanche, puis éjectée. Image : ESA/XMM-Newton, CC BY-SA 3.0 IGO

être focalisés par des miroirs, et encore, uniquement en utilisant des miroirs dans des dispositions spéciales qui ne ressemblent en rien aux miroirs des télescopes à lumière visible.

Le télescope a été lancé en 1999 et devrait fonctionner jusqu’en 2025 sur une orbite terrestre très elliptique. Toutes les 48 heures, il s’approche à moins de 7000 km de la surface de la Terre, puis s’éloigne sur une distance de 114 000 km, ceci afin de faciliter ses observations. Pensez à ce que cela implique. Pensez à la complexité de pointer avec précision les sources de rayons X choisies suffisamment longtemps pour produire des images, quand le télescope est en mouvement si rapide et si loin de nous.

La figure 26 montre une image produite par ce télescope. R Aquarii est un système symbiotique situé à 652 années-lumière, donc dans notre galaxie, dans lequel une naine blanche accumule de la matière d’une étoile moins évoluée et relativement froide. La matière est éjectée des pôles de la naine blanche, créant l’extraordinaire nébuleuse de l’image. La couleur violette diffuse représente des gaz chauds. Lorsqu’un gaz atteint des températures de plusieurs millions de degrés, il émet des rayons X. C’est la contribution à l’image fournie par XMM-Newton. Les autres couleurs représentent l’émission de lumière visible détectée par le Very Large Telescope, dont nous parlerons ci-dessous.

Un télescope à rayons gamma particulièrement important est l’INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL), lancé par l’ESA en 2002 (voir la figure 27). Il étudie les rayons gamma d’énergies moyennes, comprises entre 20 keV et 10 MeV, émis par des sources telles que les trous noirs, les étoiles à neutrons, les supernovas, etc. Le télescope a une masse de 4 tonnes et

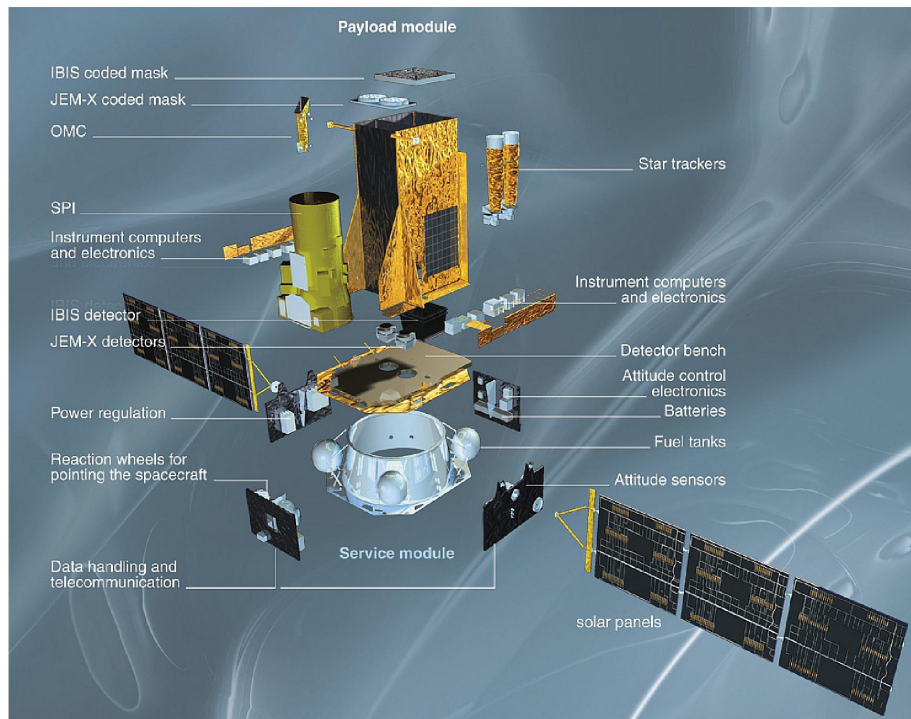


FIGURE 27 – Vue éclatée du vaisseau spatial INTEGRAL. Les dimensions sont $(5 \times 2,8 \times 3,2)$ m. Les panneaux solaires déployés mesurent 16 m de diamètre et la masse était de 4 tonnes au lancement, dont 2 tonnes de charge utile. Image : INTEGRAL consortium

suit encore une fois une orbite hautement elliptique, s’approchant de la surface de la Terre à seulement 639 km, puis s’envolant sur une distance de 156 000 km, avec une période de 66 heures. INTEGRAL est le premier observatoire spatial capable d’observer simultanément les objets célestes en rayons gamma, en rayons X et en lumière visible. Ses principales cibles sont de violentes explosions connues sous le nom de sursauts gamma, des phénomènes puissants tels que l’explosion d’étoiles et des régions de l’Univers censées contenir des trous noirs.

La figure 28 (en haut) montre une carte du ciel complète de l’émission de rayons gamma de 511 keV produite par l’annihilation électron-positon. L’image du ciel entier est projetée d’une manière particulière, en utilisant des coordonnées galactiques standards, avec le centre galactique au milieu de l’image. L’émission est clairement concentrée sur la région centrale de notre galaxie. Cela montre que quelque chose y produit des positons, mais nous ne savons pas encore quoi. Le positon est comme un électron sauf qu’il a une charge électrique opposée. C’est en fait l’antiparticule de l’électron, donc chaque fois qu’un positon rencontre un électron, ils s’annihilent. Chaque collision produit deux photons

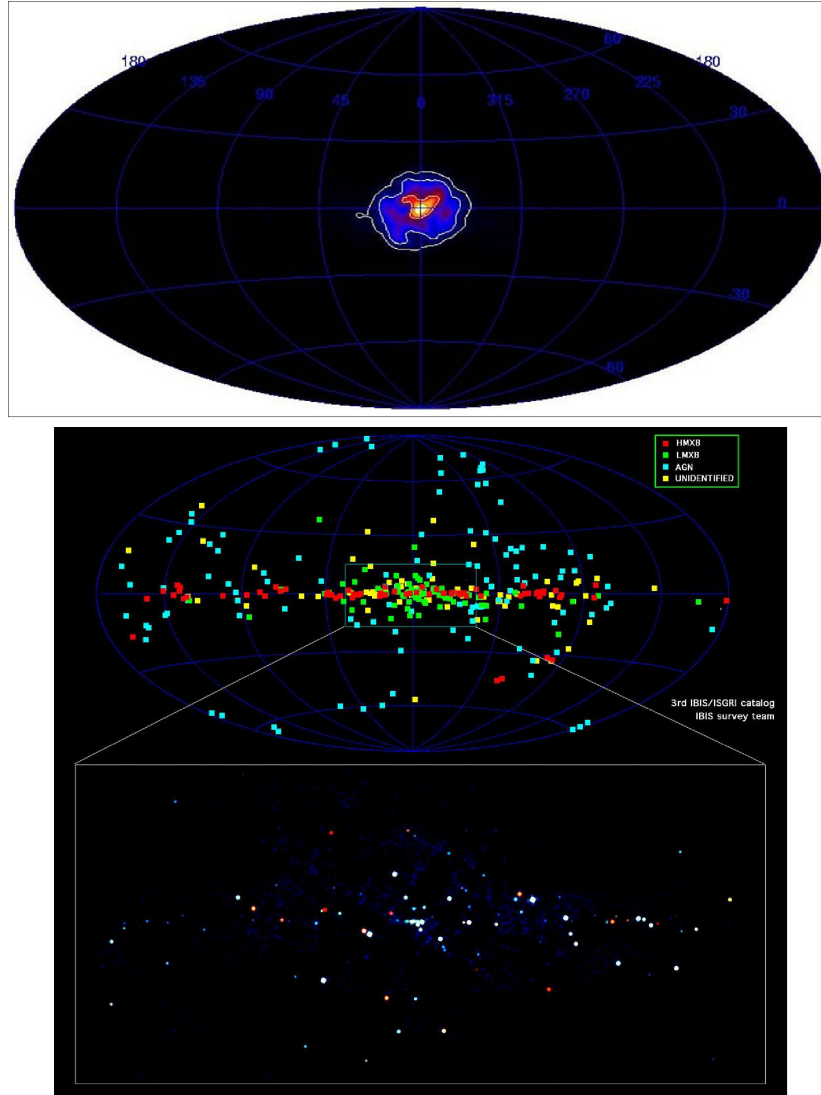


FIGURE 28 – *En haut* : carte du ciel de la ligne d'émission d'annihilation électron-positon à 511 keV. Les fausses couleurs dans cette image n'indiquent pas des énergies différentes, mais des intensités différentes du rayonnement. Image : J. Knödseder et al. *En bas* : Une étude des objets les plus denses vus par INTEGRAL. Image : ESA/IBIS Survey team, A. Bird et al

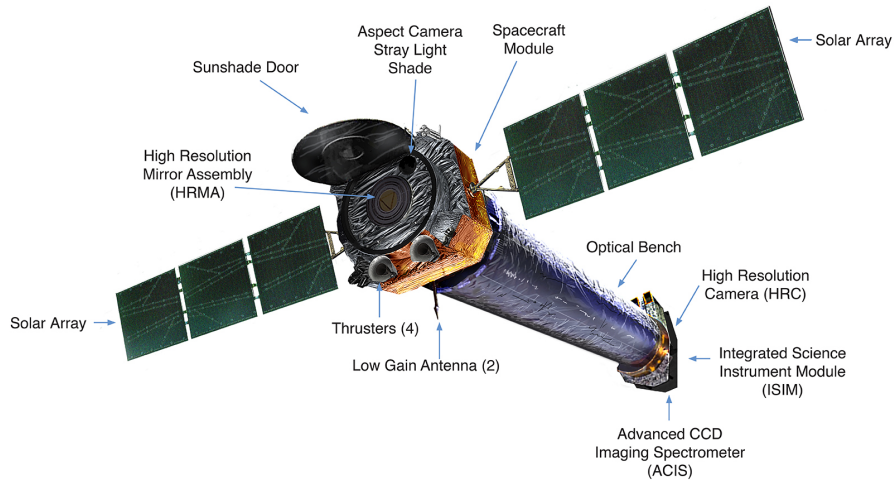


FIGURE 29 – Observatoire de rayons X Chandra. Image : NASA

gamma identiques avec la même énergie, à savoir 511 keV.

La figure 28 (en bas) montre une étude des objets les plus denses vus par INTEGRAL, encore une fois sur une carte du ciel complète en coordonnées galactiques, avec le plan de la galaxie le long de la ligne horizontale centrale. Les carrés rouges et verts représentent les objets denses découverts par INTEGRAL dans notre galaxie. Les points bleus sont des trous noirs supermassifs situés dans l'Univers lointain. Les taches jaunes sont des sources de rayons gamma jusqu'alors non identifiées. Leur répartition suggère qu'il s'agit probablement d'objets denses au sein de la Voie lactée.

Et maintenant, encore un autre télescope à rayons X (voir la figure 29). Il s'agit de l'observatoire à rayons X Chandra de la NASA, placé sur une orbite hautement elliptique autour de la Terre, comprise entre des distances de 10 000 et 140 000 km, ce qui permet de longues périodes d'observation continues. Chandra est utilisé pour étudier le rayonnement X émis par les trous noirs et les galaxies supermassifs, la nature de la matière noire et de l'énergie noire, la structure interne des étoiles à neutrons et l'évolution des étoiles massives. Il a été lancé en 1999 et il est toujours opérationnel.

La figure 30 montre une superbe image aux rayons X d'un reste de supernova appelé G292.0 + 1.8. En d'autres termes, cela montre la matière sortant d'une de ces énormes explosions stellaires. Il s'agit d'un type de reste rare car il contient de grandes quantités d'oxygène. Nous le savons grâce à l'image, car Chandra a capté la signature spectrale caractéristique de l'oxygène dans la gamme des rayons X. Cette image nous rappelle que l'on peut déduire beaucoup de choses à partir du rayonnement électromagnétique émis par un objet céleste. Chaque élément chimique possède sa propre signature, comme une empreinte digitale.

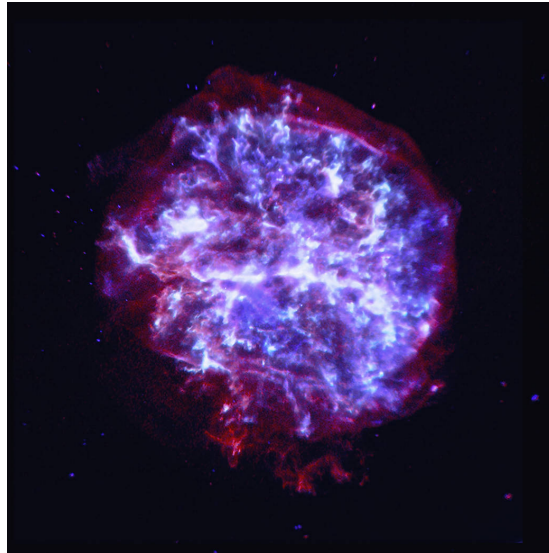


FIGURE 30 – Reste de supernova photographié par l’observatoire à rayons X Chandra. Naturellement, c’est une image en fausses couleurs, comme il s’agit d’un rayonnement que nous ne détectons pas avec nos yeux. Image : NASA/CXC/SAO

Pour rendre cela encore plus intéressant, il y a un pulsar qui fonce à travers les débris à plus d’un million de kilomètres à l’heure. Rien de tel qu’une supernova pour faire bouger les choses.

De retour sur Terre

Pendant ce temps, des choses bougent également à la surface de la Terre. Au cours des trente dernières années, des télescopes plus grands et plus performants ont été construits ici, parfaitement capables d’opérer à travers l’atmosphère. Alors, qu’a-t-on fait du problème des turbulences ? La réponse réside dans deux nouvelles technologies connues sous les noms d’optique adaptative et optique active. Sans entrer dans les détails, nous disposons désormais de moyens pour contourner les turbulences. Cela peut être illustré par le Very Large Telescope (VLT), nommé à juste titre, montré sur la figure 31.

Le VLT est le plus grand télescope de l’observatoire du Cerro Paranal, dans le désert d’Atacama, au nord du Chili, à une altitude de 2635 mètres. Il est en fait composé de quatre télescopes distincts, chacun doté d’un miroir de diamètre 8,2 m, et de quatre auxiliaires, chacun doté d’un miroir de diamètre 1,8 m. Ces télescopes peuvent fonctionner indépendamment ou en mode combiné. Dans ce dernier mode, le VLT fournit la puissance totale de collecte de lumière d’un seul télescope de diamètre 16 mètres. L’optique active et adaptative corrige les turbulences atmosphériques à différentes altitudes et ce télescope peut tout



FIGURE 31 – Le Very Large Telescope (VLT) de l’Observatoire européen austral.
CC BY-SA 3.0

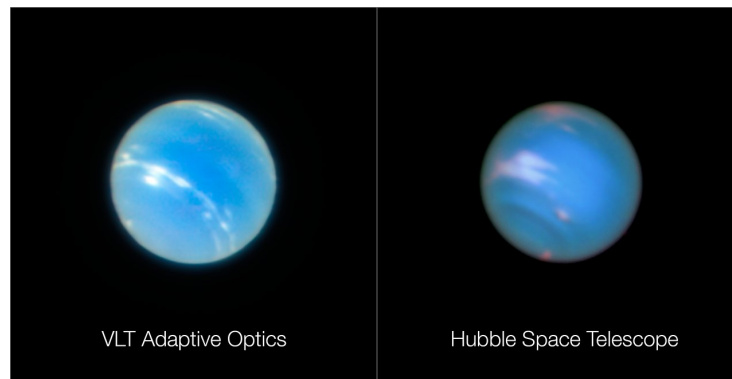


FIGURE 32 – Comparaison d’images de Neptune, prises à différentes époques.
À gauche : Image produite par le Very Large Telescope (VLT). Image : VLT. À droite : Image produite par le télescope spatial Hubble. Image : HST

détecter depuis les longueurs d’onde dans le proche UV (proche de la lumière visible violette), en passant par la partie visible du spectre, jusqu’à 25 μm dans l’infrarouge.

Avec le VLT, il est désormais possible depuis le sol d’obtenir des images de meilleure qualité que le télescope spatial Hubble. La figure 32 montre un test réalisé sur la planète Neptune, la planète connue la plus éloignée du système solaire, à environ 4,4 milliards de kilomètres, soit trente fois plus éloignée du Soleil que la Terre. Une étoile guide laser a été utilisée pour corriger les turbulences. Il s’agit d’une étoile artificielle dans le champ d’observation. Il est obtenu lorsque le laser excite les atomes de sodium dans la couche de sodium de la mésosphère terrestre, une structure constituée de sodium atomique, située entre 80 et 105 kilomètres au-dessus de la surface. Ces atomes ont une bande d’émission très

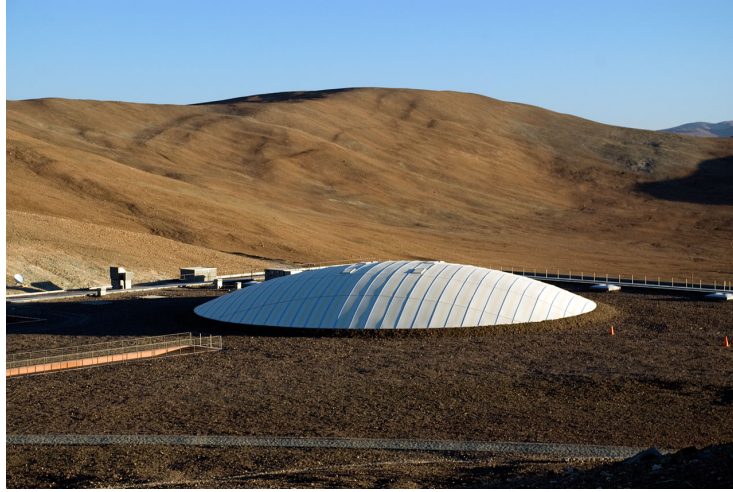


FIGURE 33 – L’hôtel des astronomes, la *Paranal Residencia*, au VLT. Image : Observatoire européen austral (ESO)

intense dans la partie orange-jaune du spectre. C’est ainsi que fonctionne l’optique adaptative. Sans cette étoile artificielle, l’utilisation de l’optique adaptative dépendait de la présence d’une étoile brillante suffisamment proche de l’objet observé.

Sur un tout autre sujet, rappelez-vous que l’observatoire à Cerro Paranal se trouve loin de tout et que les astronomes utilisant le site ont donc besoin d’un endroit pour dormir. La figure 33 montre leur hôtel, la *Paranal Residencia*, chef-d’œuvre de l’architecture des architectes allemands Auer+Weber+Assoziierte, qui a servi de décor à une partie du film *Quantum of Solace*.

Mais pour revenir aux choses plus sérieuses, le VLT a récemment établi l’existence d’un trou noir très massif au centre de notre galaxie. Regardez les images annotées de la figure 34, obtenues entre mars et juillet 2021. Elles montrent quatre étoiles en orbite très proche d’un point de la constellation du Sagittaire connu sous le nom de Sgr A*, dans le voisinage du centre galactique. L’une de ces étoiles, nommée S29, a été observée alors qu’elle effectuait son passage le plus proche de Sgr A* le 29 mai 2021. Elle n’était qu’à 13 milliards de kilomètres de Sgr A*. Cela représente seulement 90 fois la distance entre le Soleil et la Terre, et elle se déplace à la vitesse stupéfiante de 8740 kilomètres par seconde.

Qu’est-ce qui a pu la faire avancer si vite? Qu’est-ce qui pourrait la faire changer de direction si rapidement, pour suivre cette orbite si serrée? Seulement un champ gravitationnel très fort. Nous pouvons estimer la masse de l’objet qui serait nécessaire pour produire une force gravitationnelle suffisante et nous arrivons à environ 4,3 millions de fois la masse du Soleil. Et bien sûr, toute cette masse doit être à l’intérieur de l’orbite de S29. Mais on peut alors montrer en utilisant la théorie de la gravitation d’Einstein que la masse est contenue dans

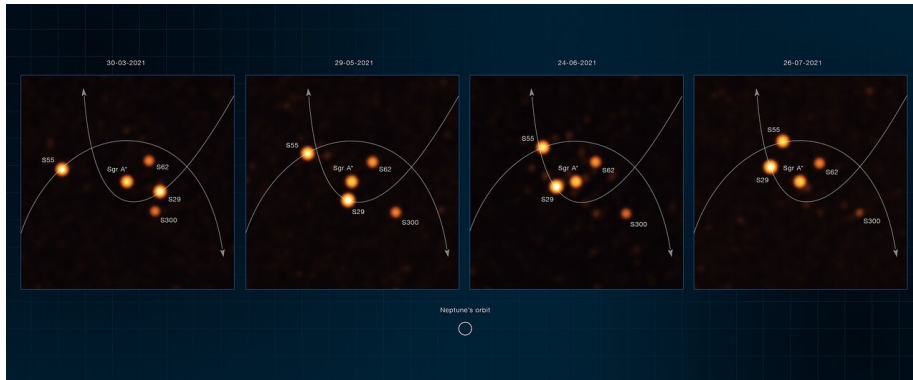


FIGURE 34 – Quatre étoiles en orbite très proche de Sgr A*, le trou noir supermassif au cœur de la Voie lactée. L'étoile S29 arrive à son point le plus proche sur la deuxième image en partant de la gauche, datée du 29 mai 2021. Les mesures combinent la lumière des quatre télescopes de 8,2 mètres du VLT, en utilisant une technique appelée interférométrie. Image : ESO/Gravity Collaboration

l'horizon correspondant à cette masse. En d'autres termes, nous avons affaire à un trou noir.

C'est une découverte vraiment formidable. Il semble que de nombreuses autres galaxies auront ces trous noirs supermassifs en leur centre. Mais nous en avons désormais la preuve dans le cas de notre propre galaxie, la Voie lactée. Et notez que nous n'avons pas besoin de voir réellement le trou noir, ce qui serait de toute façon impossible puisque la lumière ne peut pas s'en échapper. Par contre, nous pouvons déduire sa présence à partir de ces observations incroyablement précises réalisées par un télescope terrestre.

L'astronomie neutrino

Comme promis, nous nous tournons désormais vers une forme d'astronomie très récente qui ne détecte pas du tout la lumière. Cela est possible car les objets célestes produisent autre chose que des photons. Une de ces choses est le neutrino, une particule presque sans masse et qui ne porte pas de charge électrique. Jusqu'à récemment, on pensait qu'il était totalement dépourvu de masse, mais nous savons maintenant que ce n'est pas le cas. Rappelez-vous que la particule de lumière, le photon, n'a absolument aucune masse et ne porte également aucune charge électrique. Mais le photon interagit fortement avec les particules chargées électriquement, tandis que le neutrino n'interagit que très, très, très faiblement avec d'autres formes de matière. Une autre différence, pour les experts, est que les photons ont un spin 1 et les neutrinos un spin 1/2.

Le schéma de la Fig. 35 montre comment le neutrino a été découvert. Le temps est indiqué sur l'axe vertical. Un neutron entre en bas à gauche. Mais qu'est-ce qu'un neutron ? Pour commencer par le début, et en allant assez vite

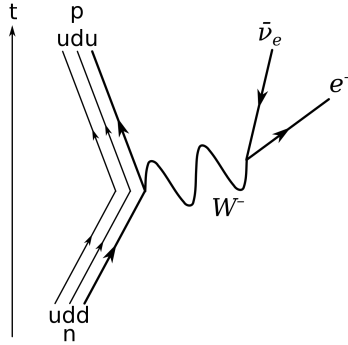


FIGURE 35 – Désintégration des neutrons libres, produisant un proton, un électron et un neutrino (strictement, un antineutrino). Image : Joel Holdsworth, domaine public

car ce n'est pas si important ici, toute la matière qui nous entoure est constituée d'atomes, chaque atome a un tout petit noyau avec des électrons qui bougent autour de lui, et chaque noyau est composé de neutrons et de protons. Aujourd'hui, on sait même que les neutrons et les protons sont composés de quarks : le proton contient deux quarks up et un quark down, liés entre eux par des gluons, tandis que le neutron contient deux quarks down et un quark up, également liés entre eux par des gluons. Lorsqu'un neutron se trouve à l'intérieur d'un noyau atomique, il est stable, mais si vous en retirez un et l'observez attentivement, il y a cinquante pour cent de chances qu'au bout d'une dizaine de minutes, il se soit transformé en proton.

En revenant à la figure, on voit que l'un des quarks down du neutron se transforme en quark up en émettant une particule W. Ce dernier se désintègre rapidement en un électron et un neutrino (en fait un antineutrino). Alors, comment le neutrino a-t-il été découvert ? En fait, lorsque ces désintégrations ont été observées pour la première fois, il y avait un problème, car on ne voyait pas les (anti)neutrinos sortir ! À ce stade, on ne savait pas que ces choses existait. Ensuite, lorsqu'ils ont mesuré l'énergie et la quantité de mouvement² du neutron, du proton et de l'électron, ils ont constaté qu'une partie de cette énergie et aussi une partie de la quantité de mouvement manquaient, alors que l'énergie et la quantité de mouvement sont censées être parfaitement conservées dans toutes ces interactions. La conclusion était qu'il devait y avoir quelque chose d'autre qui se faufilait avec l'énergie et la quantité de mouvement qui manquaient, mais sans être détecté.

Notez que les choses auraient pu être différentes. Il se pourrait que l'énergie et la quantité de mouvement ne soient pas réellement conservées dans ces réactions particulières. Mais il a ensuite été possible de corroborer l'idée qu'une particule jusqu'alors inconnue en sortait, car elle a finalement été détectée à son tour, et

2. Une grandeur physique définie comme le produit de la masse de la particule et sa vitesse.



FIGURE 36 – Le détecteur de neutrinos Super-Kamiokande est une vaste cavité construite à 1000 mètres au fond d’une mine de zinc sous le mont Ikeno, près du village de Kamioka au Japon. Image : T2K/Super-Kamiokande

toute une théorie a surgi, appelée théorie de l’interaction faible. La force faible est l’une des quatre forces fondamentales que nous connaissons jusqu’à présent, avec la force forte, la force électromagnétique et la gravité.

Comme vous l’avez peut-être deviné, la force faible est . . . faible. Et le neutrino n’interagit *uniquement* par l’intermédiaire de cette force, c’est-à-dire ni très souvent ni beaucoup. Les neutrinos intéressent depuis longtemps les astronomes, car nous savons qu’il y a des réactions nucléaires à l’intérieur d’étoiles comme le Soleil, et les astronomes ont construit des théories au sujet de ces réactions. Dans le Soleil, la plus importante est la transformation de l’hydrogène en hélium. Il n’est pas surprenant que ces réactions nucléaires soient toutes de grandes productrices de neutrinos, et nous nous attendons à ce qu’ils sortent du Soleil en quantités énormes et à grande vitesse, se précipitant à travers l’espace dans toutes les directions. Certains d’entre eux devraient donc finir ici sur Terre.

Comme je l’ai dit il y a un instant, les neutrinos interagissent à peine avec la matière. C’est une chance pour nous. Tendez la main et regardez l’ongle de votre index. Sa superficie est d’un peu plus d’un centimètre carré. Alors, environ 65 milliards de neutrinos solaires traversent cette superficie chaque seconde. Même la nuit, car la Terre ne constitue aucun obstacle. La plupart des neutrinos du Soleil traversent la Terre comme si elle n’existait pas.

Outre la génération de neutrinos à l’intérieur des étoiles, un important bruit de fond de neutrinos aurait été produit lors du Big Bang, et nous savons également aujourd’hui que 99% de l’énorme quantité d’énergie libérée par une explosion de supernova est sous la forme de neutrinos se déplaçant très rapidement, c’est-à-dire des neutrinos avec beaucoup d’énergie cinétique. Ce sont

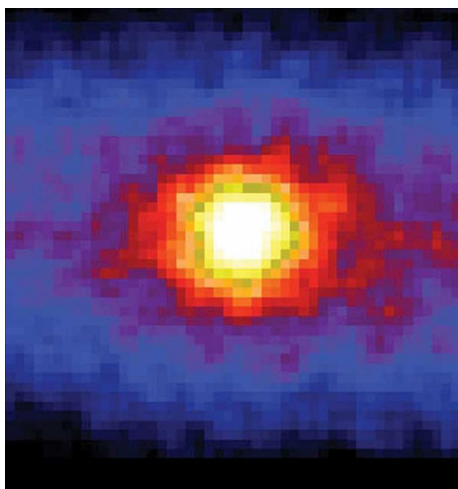


FIGURE 37 – Photo du Soleil prise la nuit en regardant à travers la Terre. Image : R. Svoboda, K. Gordan, Super-Kamiokande

d'autres phénomènes que nous aimerions mieux comprendre, et la capture des neutrinos d'une supernova, ainsi que du rayonnement électromagnétique, nous aidera à corroborer ou à affiner nos théories sur ce qui se passe dans ces explosions stellaires. Après tout, notre curiosité est sans limite. La figure 36 montre un télescope à neutrinos.

Bien entendu, un observatoire de neutrinos n'est qu'un appareil permettant de détecter les neutrinos. En raison de la faiblesse de l'interaction entre les neutrinos et la matière, ces dispositifs doivent être très étendus pour en détecter un nombre significatif. De tels observatoires sont souvent construits sous terre pour isoler le détecteur des rayons cosmiques et autres rayonnements de fond. Super-Kamiokande est construit sous le mont Ikeno au Japon. Il est situé à 1000 mètres de profondeur dans une mine de zinc près du village de Kamioka. Il est constitué d'une vaste salle souterraine de 40 m de diamètre et 58 m de hauteur. Les parois sont entièrement recouvertes de plaques d'acier inoxydable pour créer une cuve étanche. Les parois internes et externes du réservoir sont recouvertes de détecteurs de lumière et le réservoir est rempli de 50 000 tonnes d'eau ultra pure.

La détection fonctionne plutôt indirectement. Parfois l'un des milliards de milliards de neutrinos traversant l'eau interagira avec un noyau atomique dans les molécules d'eau pour produire une particule chargée très rapide. Lorsqu'une telle particule se déplace dans l'eau à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans l'eau, une émission caractéristique de rayonnement électromagnétique se produit, et c'est celle-ci qui est détectée dans les détecteurs de lumière situés sur les parois de l'observatoire. De la détection de la lumière, on peut déduire beaucoup de choses sur le neutrino qui l'a déclenché. En 1987, l'expérience pionnière Kamiokande – celle qui a précédé Super-Kamiokande – a

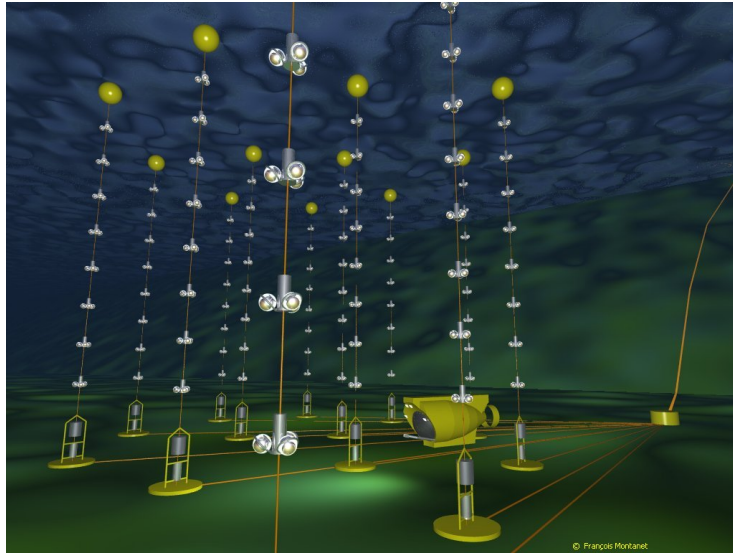


FIGURE 38 – Le détecteur de neutrinos Antares. Image : François Montanet CC BY-SA 2.0

détecté des neutrinos de la supernova SN 1987A, dans le Grand Nuage de Magellan, une petite galaxie pas si loin de la nôtre. L'étoile qui a explosé était une supergéante bleue d'une masse initiale d'environ vingt fois celle du Soleil.

Et maintenant, la preuve que les neutrinos peuvent traverser la Terre. La figure 37 montre une photo du Soleil prise de nuit, c'est-à-dire en regardant à travers l'ensemble de la planète Terre, soit environ 13 000 km de roche, avec le détecteur de neutrinos Super-Kamiokande. En fait, ce n'est pas vraiment une photographie, car l'image en fausses couleurs a été produite par des détections de neutrinos et non pas par des détections de photons. Les couleurs représentent les intensités du flux de neutrinos.

La figure 38 montre un autre détecteur de neutrinos appelé Antares, immergé dans la Méditerranée au large de La Seyne-sur-Mer, près de Toulon en France. Il a été opérationnel entre 2008 et 2022. Le détecteur a été installé à 2500 mètres de profondeur, à quarante kilomètres au large de La Seyne-sur-Mer. Il était composé de 885 détecteurs de lumière répartis le long de 12 lignes sur une superficie de $0,1 \text{ km}^2$ et environ 450 mètres de hauteur. Les neutrinos détectés étaient, comme d'habitude, les rares qui interagissaient avec la matière située à proximité du détecteur. Contrairement aux télescopes optiques, Antares a observé à travers la Terre.

Il existe aujourd'hui de nombreux autres observatoires de neutrinos. Il y en a même un enfoui dans les glaces de l'Antarctique. Les neutrinos pourront à terme fournir une source unique d'informations sur ce qui se passe dans l'Univers.



FIGURE 39 – Bras nord du Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) à Hanford, USA. CC BY-SA 3.0

Astronomie gravitationnelle

L'astronomie gravitationnelle implique la détection des ondes gravitationnelles. Mais que sont-elles ? Ce sont des oscillations de quoi ? Albert Einstein a prédit l'existence des ondes gravitationnelles en 1916. Selon sa théorie de la relativité générale récemment publiée, il s'agissait d'oscillations de la courbure de l'espace-temps. Cela correspond à l'idée que la gravité n'est pas réellement une force. Les objets massifs n'attirent pas vraiment d'autres objets massifs. Ils courbent l'espace-temps. Mais ne vous inquiétez pas pour ça. Il faut connaître pas mal de mathématiques pour comprendre la théorie.

Je vais vous dire concrètement ce que cela signifie, c'est-à-dire ce que nous pourrions espérer observer exactement lorsque des ondes gravitationnelles passent par là. Premièrement, tout comme les ondes électromagnétiques sont produites par des particules chargées accélérées, les ondes gravitationnelles sont produites par des masses accélérées et se propagent à la même vitesse que la lumière dans le vide. Naturellement, les masses accélèrent tout le temps, par exemple lorsqu'une étoile tourne autour d'une autre dans un système stellaire binaire, ou lorsqu'une planète tourne autour d'une étoile, et même à chaque fois que vous bougez votre corps. Ces ondes sont partout. Cependant, les effets sont faibles à moins que les masses et les accélérations ne soient grandes. Si vous voulez détecter quelque chose, pensez donc plutôt à une collision entre deux étoiles à neutrons.

En fait, la réalité des ondes gravitationnelles a été longuement débattue. Einstein lui-même a changé d'avis à plusieurs reprises sur ce sujet. Afin de trancher,

seule l'expérience pourrait lever tout doute, et ce faisant, fournir un test radicalement nouveau de la théorie d'Einstein. Les premières expérimentations ont débuté dans les années 1960, mais il a fallu attendre 2016 pour que l'existence d'ondes gravitationnelles soit enfin confirmée, grâce à une première observation réalisée le 14 septembre 2015, identifiée comme étant due à une collision entre deux trous noirs. Inutile de préciser que cette observation a ouvert un nouveau champ d'observation de l'Univers, et à très grande échelle, puisque les ondes gravitationnelles ne sont en aucun cas bloquées par la présence de matière.

La figure 39 montre un bras d'un télescope à ondes gravitationnelles, le Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO). LIGO est un interféromètre géant existant en deux exemplaires aux Etats-Unis. L'un est situé à Livingston, en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'état de Washington. Le 11 février 2016, la collaboration LIGO-Virgo a annoncé la première observation d'ondes gravitationnelles, à partir d'un signal (nommé GW150914) détecté à 09 :50 :45 GMT le 14 septembre 2015 à partir de deux trous noirs de masses de 29 et 36 masses solaires, fusionnant à environ 1,3 milliards d'années-lumière. Virgo est la version européenne de LIGO (voir ci-dessous). Au cours de la dernière fraction de seconde de la fusion, elle a libéré plus de cinquante fois la puissance de toutes les étoiles de l'univers observable réunies. La masse du nouveau trou noir fusionné était de 62 masses solaires. Ainsi, une énergie équivalente à trois fois la masse du Soleil a été émise sous forme d'ondes gravitationnelles.

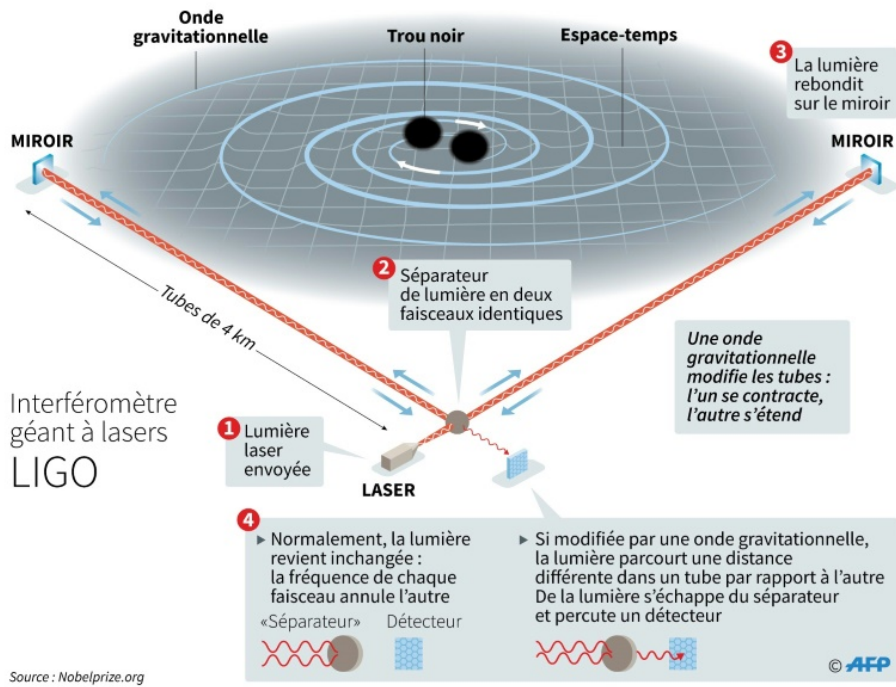
Alors, que font réellement les ondes gravitationnelles ici sur Terre pour se faire détecter ? Et pourquoi a-t-il fallu cent ans à partir de la prédiction de 1916 pour obtenir la première confirmation d'une détection en 2016 ? La figure 40 montre la configuration expérimentale de manière schématique. Comme mentionné ci-dessus, les ondes gravitationnelles traversent constamment la Terre. Cependant, même les plus puissants ont un effet minime. En effet, c'est un euphémisme. Par exemple, les ondes émises par la fusion cataclysmique de deux trous noirs ont atteint la Terre après avoir parcouru plus d'un milliard d'années-lumière sous la forme d'une ondulation dans l'espace-temps qui a modifié la longueur des bras LIGO de 4 km d'un millième de la largeur d'un proton. Oui, vous avez bien entendu. Cela représente un milliardième de milliardième de mètre. Cela équivaut proportionnellement à modifier la distance jusqu'à l'étoile la plus proche en dehors du système solaire de la largeur d'un cheveu.

Cet effet infime des ondes gravitationnelles, même les plus extrêmes, les rend observables sur Terre uniquement avec les détecteurs les plus sophistiqués. A noter que le détecteur comporte deux bras, longs chacun de quatre kilomètres, disposés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. En effet, les ondes gravitationnelles étirent une direction de l'espace tout en contractant la direction perpendiculaire, puis contractent la première direction de l'espace tout en étirant la seconde. Alors, comment détecter ces minuscules changements de longueur ? La première chose à faire est de rendre les bras du détecteur aussi longs que possible, afin que le changement de longueur soit le plus important possible. La figure explique le reste, mais voici mon explication.

Un laser produit un faisceau lumineux d'une longueur d'onde exactement connue. Le séparateur de faisceau garantit qu'une copie identique pénètre dans

Le détecteur d'ondes gravitationnelles

Pour sa conception et ses résultats, les astrophysiciens
Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne récompensés



Source : Nobelprize.org

FIGURE 40 – Vue schématique de l'un des deux détecteurs LIGO, avec une vue encore plus schématique des deux trous noirs en train de spiraler l'un vers l'autre. Les deux bras perpendiculaires mesurent chacun quatre kilomètres de long. Les ondes gravitationnelles provoquées par la collision de deux trous noirs ont été détectées dans la figure d'interférence entre les faisceaux laser des deux bras, grâce à l'extrême sensibilité du dispositif, qui permet de résoudre des distances des milliers de fois inférieures à celles du noyau atomique. Image : Johan Jarnestad, The Royal Swedish Academy of Sciences CC BY 4.0

chaque tunnel. Les miroirs renvoient les faisceaux vers le séparateur de faisceaux, qui les superpose. Nous faisons en sorte que les deux ondes reviennent complètement déphasées vers le séparateur de faisceau, ce qui signifie qu'elles s'annulent exactement et que rien ne sera détecté dans le détecteur. Cela se fait en ajustant la longueur des deux bras entre le séparateur de faisceau et les miroirs de sorte que l'un soit plus court d'un quart de la longueur d'onde que l'autre. (Pourquoi un quart ? Complètement déphasé signifie différer d'une demi-longueur d'onde, donc un quart de longueur d'onde en remontant le bras et un quart en revenant.)

Maintenant, lorsqu'une onde gravitationnelle passe, elle rapproche très, très légèrement le miroir d'un bras du séparateur de faisceau et éloigne le miroir de l'autre bras très, très légèrement du séparateur de faisceau. En supposant que la lumière des faisceaux laser n'est pas elle-même directement affectée par l'onde gravitationnelle, les ondes lumineuses des faisceaux réunis ne seront plus parfaitement déphasées lorsqu'elles se retrouveront au niveau du séparateur de faisceau. Donc quelque chose va maintenant être détecté.³

Mais comment passer de ce signal détecté à la déduction qu'il a été provoqué par la fusion de deux trous noirs ? Tout se résume à des simulations informatiques car les calculs avec la théorie de la relativité générale sont difficiles. Nous demandons donc à l'ordinateur de simuler les ondes gravitationnelles qui seraient produites dans différents scénarios, par exemple une fusion de deux trous noirs, une fusion de deux étoiles à neutrons, une supernova, etc., puis de comparer avec le signal détecté. La confirmation qu'un signal correspond bien à un événement cosmique majeur et non à une perturbation locale peut prendre un temps considérable.

Il existe également un observatoire d'ondes gravitationnelles en Europe (voir la figure 41 ci-dessus). Virgo est située à Santo Stefano a Macerata, un village de Cascina, près de Pise en Italie. Ce détecteur est hébergé par l'European Gravitational Observatory (EGO), à l'origine une projet des gouvernements italien et français. La collaboration internationale résultante comprend des centres de recherche de cinq pays : la France et l'Italie (les deux pays à l'origine du projet), les Pays-Bas, la Pologne et la Hongrie. La science dépasse toujours les frontières.

Comme ses cousins LIGO, le détecteur Virgo est un interféromètre de Michelson, isolé des perturbations extérieures, avec des miroirs et instrumentation suspendus pour échapper aux effets des vibrations, et un vide très poussé dans les canalisations contenant les faisceaux laser (voir la figure 41 bas). Chaque bras mesure trois kilomètres de long et Virgo est la plus grande installation d'ultra-vide d'Europe, avec un volume total de 6800 mètres cubes. Les deux bras sont constitués de longs tuyaux en acier de 1,2 m de diamètre, dans lesquels la pression résiduelle est d'environ un millième de milliardième de la pression atmosphérique. Cela garantit que les molécules de gaz résiduelles – principalement l'hydrogène et l'eau – aient un impact limité sur le trajet des faisceaux laser.

3. La longueur d'onde de la lumière dans chaque bras est en fait directement affectée par l'onde gravitationnelle, mais cet effet est négligeable dans cette configuration [8].



FIGURE 41 – Observatoire des ondes gravitationnelles Virgo. *En haut* : vu du ciel, montrant les deux bras, chacun mesurant 3 km de long et perpendiculaires l'un à l'autre. *En bas* : à l'intérieur du tunnel ouest. Chaque tunnel contient un tube dans lequel les faisceaux laser voyagent sous ultra-vide. Image : EGO/Virgo. CC BY SA

En 2017, après avoir effectué une mise à niveau significative pour améliorer sa sensibilité, Virgo a rejoint LIGO vers la fin de la deuxième période d'observation de LIGO, marquant la première fois que trois détecteurs d'ondes gravitationnelles comparables fonctionnaient à l'unisson. Dans les trois semaines qui ont suivi l'arrivée de Virgo dans les recherches, non seulement ils ont effectué leur première détection, mais ils ont également contribué à localiser la source des premières ondes gravitationnelles détectées par la fusion d'étoiles à neutrons, un événement cosmique qui a également émis un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire, de la lumière (nous en parlerons davantage dans un instant). Virgo continue d'observer aux côtés de LIGO dans les séries d'observations actuelles [7].

Le 9 décembre 2017, les astronomes ont assisté à leur première kilonova. C'est le nom d'une fusion d'étoiles à neutrons. L'événement s'est produit à environ 140 millions d'années-lumière de la Terre et a été annoncé pour la première fois

par l'apparition d'un certain schéma d'ondes gravitationnelles, ou ondulations dans l'espace-temps, déferlant sur la Terre. Ces ondes gravitationnelles ont été détectées à la fois par LIGO et par Virgo, et celles-ci ont immédiatement informé la communauté astronomique qu'elles avaient vu une ondulation distincte dans l'espace-temps qui ne pouvait que signifier que deux étoiles à neutrons étaient entrées en collision. Moins de deux secondes plus tard, le télescope spatial à rayons gamma Fermi – encore un autre observatoire à haute énergie dans l'espace – a détecté un bref et brillant éclair de rayons gamma, c'est-à-dire un sursaut gamma.

Une vague d'intérêt scientifique s'est déchaînée. Les astronomes du monde entier ont entraîné leurs télescopes, antennes et observatoires en orbite pendant l'événement kilonova, le balayant sur toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Au total, environ un tiers de l'ensemble de la communauté astronomique mondiale a participé à cet effort. Il s'agit peut-être de l'événement astronomique le plus largement décrit de l'histoire de l'humanité, avec plus d'une centaine d'articles scientifiques sur le sujet parus au cours des deux premiers mois. C'était un bel exemple d'*astronomie multi-messagers*, c'est-à-dire d'astronomie basée sur l'observation et l'interprétation coordonnées de signaux transportés par des « messagers » disparates : rayonnement électromagnétique, ondes gravitationnelles et neutrinos.

Les kilonovas étaient prédites depuis longtemps, mais avec un taux d'occurrence d'un seulement tous les 100 000 ans par galaxie, les astronomes ne s'attendaient pas vraiment à en voir un si tôt. En comparaison, les supernovas se produisent toutes les quelques décennies dans chaque galaxie. Et l'ajout de signaux d'ondes gravitationnelles a fourni un aperçu sans précédent de l'événement lui-même. Entre ondes gravitationnelles et observations électromagnétiques traditionnelles, les astronomes avaient une vision complète dès le début de la fusion. Cette kilonova a produit à elle seule plus de cent fois la masse de la Terre en métaux précieux purs, confirmant que ces explosions sont une grande source d'éléments lourds. Bref, il y a de fortes chances que l'or de vos bijoux ait été forgé à partir de deux étoiles à neutrons entrées en collision bien avant la naissance de notre système solaire.

Juste une note à ce sujet. C'est vraiment de l'alchimie : la création d'éléments chimiques à partir de différents éléments chimiques. L'or n'est pas un élément très courant dans l'Univers. Il se pourrait bien que la majeure partie de l'or que nous trouvons ait été créée lors d'événements comme ceux-ci, une idée étonnante, je pense que vous en conviendrez. Mais ce qui est encore plus étonnant, c'est que nous pouvons déjà expliquer les abondances observées de nombreux éléments chimiques. La majeure partie de l'hydrogène et de l'hélium a été créée à l'origine de l'Univers, tandis que les autres éléments ont été principalement produits par des réactions nucléaires à l'intérieur des étoiles. Le nom des astronomes pour l'alchimie est la nucléosynthèse stellaire.

Comment se fait-il que les alchimistes ne soient jamais arrivés ? Eh bien, il faut des températures et des pressions énormes pour déclencher la nucléosynthèse et transformer un type d'élément chimique en un autre. Le genre de températures et de pressions que l'on trouve dans les étoiles. Les alchimistes étaient loin d'at-

teindre de telles conditions. Ils faisaient de la chimie : transformer un type de molécule en un autre. Ils ne savaient pas que l'alchimie se déroulait aux confins de l'espace, et qu'en ce qui concerne l'or, les vrais alchimistes étaient probablement des étoiles à neutrons.

Références

- [1] www.spitzer.caltech.edu/image/ssc2007-03a1-comets-kick-up-dust-in-helix-nebula
- [2] en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope
- [3] en.wikipedia.org/wiki/Cartwheel_Galaxy
- [4] en.wikipedia.org/wiki/Supernova
- [5] en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star#Notes
- [6] Hessels, J., Ransom, S.M., Stairs, I.H., Freire, P.C.C., et al., A radio pulsar spinning at 716 Hz, *Science* **311**, no. 5769, 1901–1904 (2006)
- [7] www.ligo.caltech.edu/page/ligo-sister-facilities
- [8] Saulson, P.R., If light waves are stretched by gravitational waves, how can we use light as a ruler to detect gravitational waves? *Am. J. Phys.* **65**, 501–505 (1997)