

== SPACE ==

& Vous

L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

SÉBASTIEN CLESSE

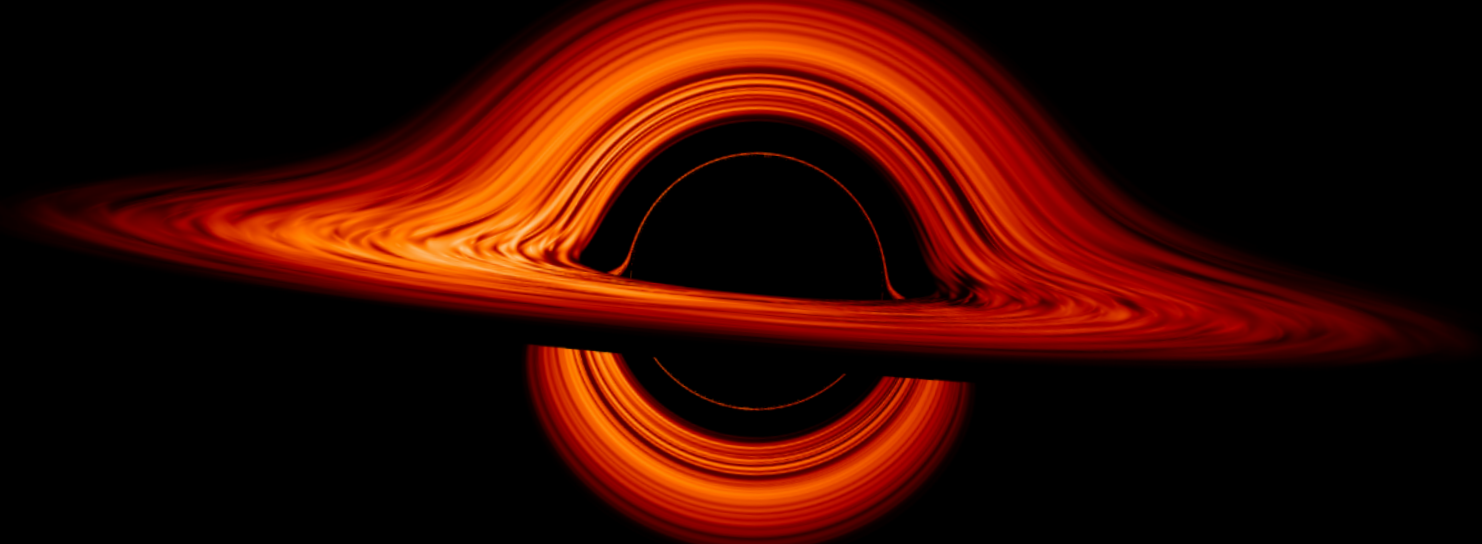
Credit images : NASA, PxHere, Wikimedia
Ed. Resp. : M. Swaelens - ULB CP238 - 1050 Bruxelles

INFOS : SCIENCES.BRUSSELS/SPECTACLE

SPECTACLE DIDACTIQUE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

3^e > 6^e SECONDAIRE & GRAND PUBLIC

ULB CAMPUS DU SOLBOSCH



L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

Sébastien Clesse

L'EXPÉRIENCE DES RÉVOLUTIONS!

Si l'on devait nommer une expérience aux oscars de la Physique dans la catégorie « Expérience qui a révolutionné notre compréhension de l'Univers à plusieurs reprises », c'est sans aucun doute l'interféromètre de Michelson qui remporterait la statuette... à l'effigie d'Albert Einstein, bien sûr.

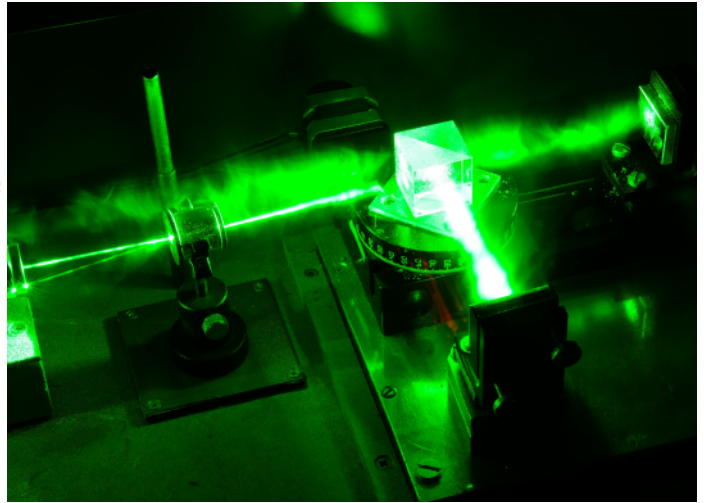
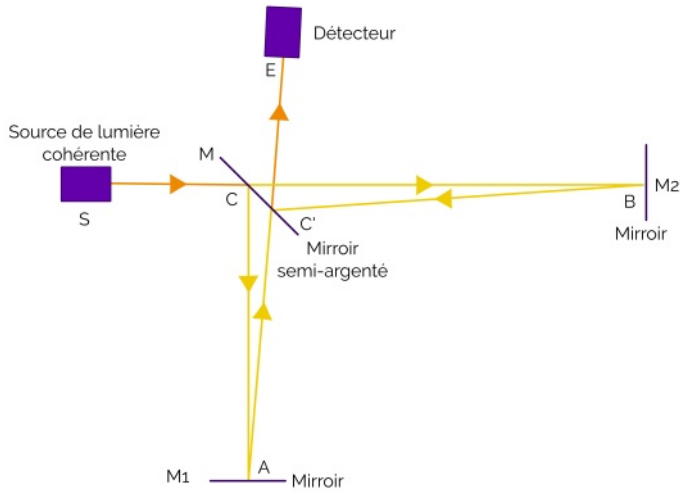
La méchante sorcière de Blanche-Neige ne se serait pas doutée des découvertes majeures à réaliser en manipulant quelques miroirs... Miroir, miroir, dis-moi si l'espace est rempli d'éther? Miroir, miroir, dis-moi si la vitesse de la lumière est identique pour tous? Miroir, miroir, peux-tu me détecter un trou noir? Autant de questions que les physiciens se sont posées face à ces miroirs, et pour lesquelles ils ont obtenu une réponse!

UNE RECETTE SIMPLE

Afin de réaliser un interféromètre de Michelson (physicien américain, 1852-1931), préparez les ingrédients suivants: • 1 source de lumière cohérente, par exemple un laser • 2 miroirs • 1 miroir semi-réfléchissant • 1 écran ou 1 photo-détecteur Placez-les comme sur le schéma

ci-dessous. Partant de la source, le faisceau lumineux se sépare en deux au niveau du miroir semi-réfléchissant. De chaque côté, une moitié de faisceau effectue un aller-retour, étant réfléchi à chaque extrémité par un miroir. Le faisceau est ensuite recombinaison et achève son parcours au niveau de l'écran ou du détecteur.

Comme la lumière est une onde, on peut régler très précisément la position des miroirs pour que la distance parcourue de chaque côté soit exactement la même (ou à un certain nombre de longueurs d'onde près). Dans ce cas, le signal ondulatoire des deux demi-faisceaux se superpose exactement et l'intensité lumineuse sur l'écran ou au niveau du détecteur sera maximale. Par contre, si la distance parcourue n'est pas tout à fait identique, ou si la vitesse de la lumière n'est pas tout à fait la même le long de chaque chemin, alors un phénomène d'interférence apparaît, et l'intensité lumineuse observée sera plus faible. Dans certains cas, une onde peut carrément en annuler une autre (onde en opposition de phase) et l'intensité lumineuse sur l'écran sera nulle, on parle alors d'interférence destructrice. Sur l'écran on peut



A gauche: Schéma d'un interféromètre de Michelson. Partant d'une source de lumière cohérente (laser, point S), un faisceau lumineux traverse ou se reflète sur un miroir semi-réfléchissant (M) au point C. La partie du faisceau réfléchi part vers un miroir M1 dans lequel il est réfléchi (au point A) et rebrousse chemin jusqu'en C. La partie du faisceau transmise est réfléchi par un second miroir M2 (en B) et revient également en C'. Le faisceau est recombinaison et envoyé vers le détecteur en E. A droite: Photo de l'appareillage. La présence des faisceaux lasers est mise en évidence grâce à un fugigène.

observer la figure d'interférence, qui est une série concentrique de maxima et minima lumineux.

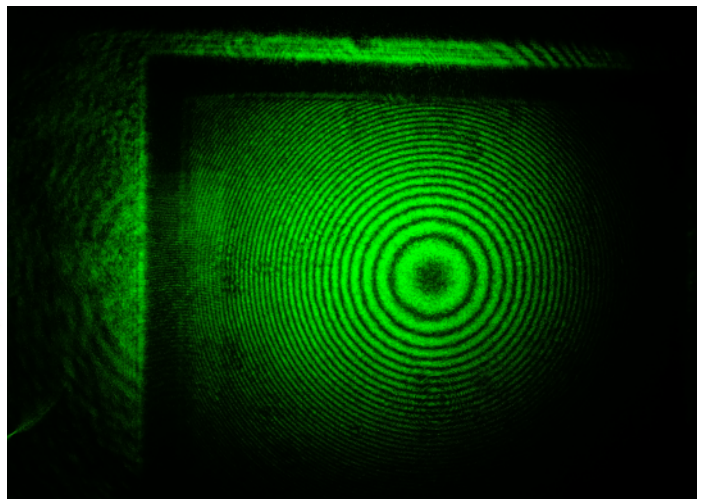
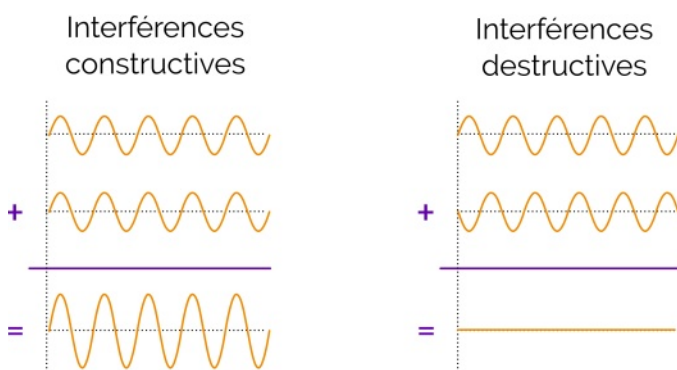
Servir frais à votre physicien.ne préféré.e.

PAS D'ÉTHER AUTOUR DE LA TERRE!

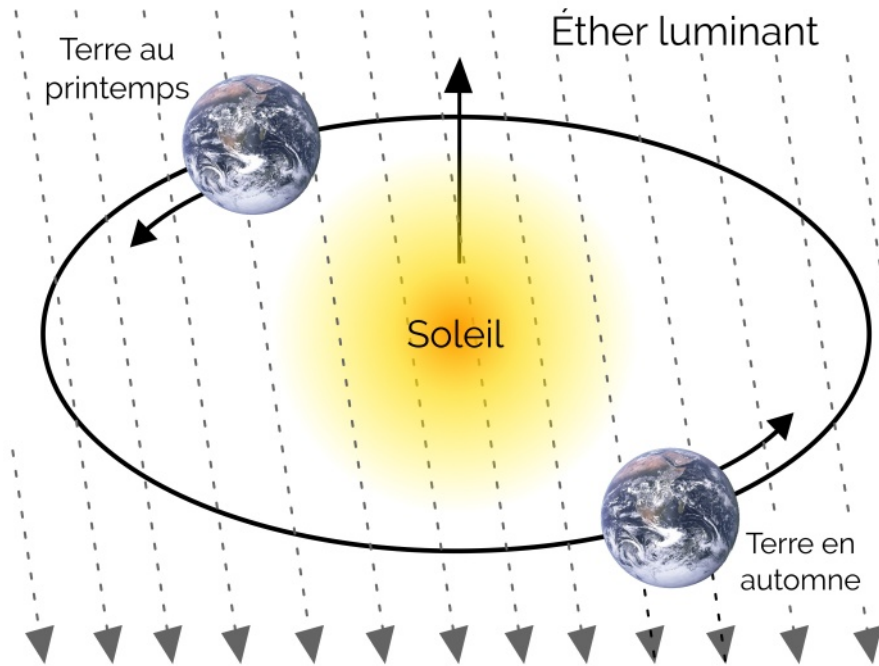
Tant pour Newton, Descartes, Maxwell et d'autres grands noms de la Physique, il est inconcevable que la gravitation ou la lumière puissent traverser un espace totalement vide. L'hypothèse scientifique la plus pertinente est alors que l'espace interplanétaire est rempli d'un fluide subtil et mystérieux, appelé

éther, qui sert de médiateur, de support, pour la transmission de la force gravitationnelle et de la lumière. Mais comment mettre en évidence cet éther? Fin du 19ème siècle, Michelson et Morley ont une idée géniale: comme la Terre doit se déplacer dans l'éther lors de sa course folle autour du soleil, on devrait pouvoir mettre en évidence l'existence de cet éther et le mouvement de la Terre par rapport à lui, grâce à l'interféromètre décrit ci-dessus. En effet, si la Terre, sur laquelle est posé notre interféromètre, se déplace vers la droite (sur le schéma de l'interféromètre) dans l'éther fixe, alors on s'attend à ce que le trajet de la lumière pas-

sant par le miroir M2 soit un plus court et plus rapide que le trajet par le miroir M1, car la Terre se déplace un peu vers la droite pendant le « temps de vol » de la lumière. Il devrait s'en suivre une modification de la figure d'interférence sur l'écran, détectable par l'instrument si la Terre se déplace à plus de 30 km/s par rapport à l'éther, comme le suggère sa course autour du soleil. Résultat de l'expérience: nada. Aucune différence! Si éther il y a, la Terre n'est pas en mouvement par rapport à lui. En réalité, il faut abandonner complètement l'idée de l'éther, et accepter l'évidence, même si c'est totalement contre-intuitif: la vitesse de la lu-



A gauche: Interférence produite par deux signaux ondulatoires en phase, ou déphasés. Dans le premier cas, l'amplitude du signal est doublée (interférence constructive). Dans le second cas, le signal s'annule (interférence destructive). A droite: Photo de la figure d'interférence sur l'écran placé en sortie d'un interféromètre de Michelson.



A différents moments de l'année, la vitesse de la Terre par rapport à l'éther change. La vitesse de la lumière, si elle est transportée par l'éther à vitesse constante, devrait donc changer en fonction de la position de la Terre dans la course autour du soleil. Michelson et Morley ont tenté de mettre en évidence cet effet expérimentalement, grâce à leur interféromètre, mais sans succès. L'éther n'existe pas, chose encore plus surprenante, la vitesse de la lumière est identique pour tous, peu importe à quelle vitesse on se déplace.

mière est la même pour tout le monde, que l'on se déplace ou non par rapport à elle. Alors que nous sommes tous d'accord pour dire que, pour un vélo, un train, ou toute autre chose, ce n'est pas le cas. Par exemple, si on court à 10km/h vers un vélo roulant vers nous à 20km/h, le choc se fera à 30km/h. Pour la lumière, rien n'y fait. Même à 30 km/s, que je m'éloigne ou me rapproche d'une source lumineuse, la vitesse de la lumière mesurée sera toujours et inlassablement de 299 792 458 m/s. Einstein trouvera la solution à ce paradoxe avec sa théorie de la relativité restreinte, impliquant une contraction des longueurs et une dilatation du temps entre des observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre. Ce sont le temps et l'espace qui « conspirent entre eux » afin que la vitesse de la lumière soit toujours identique, inlassablement invariable, dans toutes les situations. C'est encore aujourd'hui une des lois les plus troublantes de la nature, car elle remet en cause notre perception

intuitive du temps et de l'espace. Mais les effets de la relativité sont aujourd'hui mesurés et vérifiés avec une très grande précision, en laboratoire, dans l'espace, en astronomie, etc.

OBSERVER LA FUSION DE TROUS NOIRS, GRÂCE AUX ONDES GRAVITATIONNELLES

L'interféromètre de Michelson est également à l'origine d'une découverte majeure réalisée en 2015 par la collaboration LIGO/Virgo couronnée du prix Nobel en 2017: la détection d'ondes gravitationnelles issues de la fusion de deux trous noirs. Continuez votre lecture pour en savoir plus sur les trous noirs, les ondes gravitationnelles, et comment les détecter.

LES TROUS NOIRS

S'il est un objet astrophysique qui suscite l'imaginaire, déclenche les débats les plus fous et inspire les scénarios de films ou de séries les plus rocambolesques, c'est cer-

tainement le trou noir! Mais qui comprend vraiment ce qu'est un trou noir? Pourtant, pas besoin d'avoir suivi un cours universitaire de relativité générale ou d'avoir réalisé un doctorat en physique théorique pour comprendre le principe de base.

POURQUOI NE PEUT-ON PAS SORTIR D'UN TROU NOIR ?

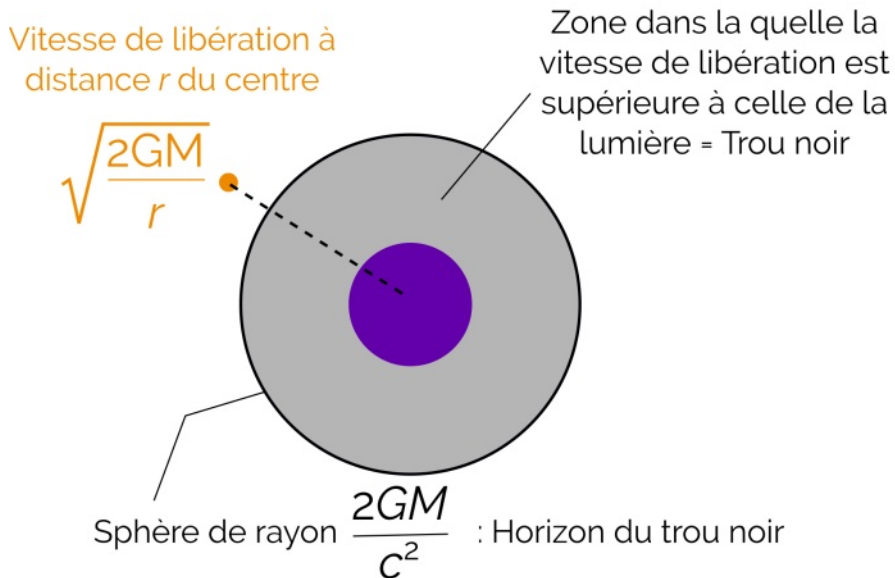
On sait tous que la Terre nous attire, et que pour échapper à son attraction gravitationnelle, ça ne sert à rien de sauter. Par contre, on peut grimper dans une fusée et propulser celle-ci suffisamment vite (au moins 11,2 km/s, soit environ 40 000 km/h). Un petit calcul simple à base d'énergie potentielle et cinétique nous donne la formule de la vitesse de libération d'un objet sur une planète quelconque, en fonction de sa masse (M) et de sa taille (son rayon R) :

$$v_{\text{libération}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

où G est la constante de gravitation de Newton. Prenons mieux qu'une fusée: ce qui va le plus vite au monde, la lumière (vitesse $c = 300\,000\,000$ km/s) et cherchons, grâce à l'équation ci-dessus, quelle devrait être le rayon de la Terre (tout en conservant sa masse) pour que la vitesse de la libération soit égale à celle de la lumière :

$$R = \frac{2GM}{c^2} = 0.9 \text{ cm pour la terre}$$

Cela signifie que si l'on parvient à compresser la Terre pour qu'elle prenne la taille d'une bille, rien, pas même la lumière, ne pourra s'affranchir de son attraction gravitationnelle. Ce sera donc une bille noire, un trou noir.



LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET LE TROU NOIR D'INTERSTELLAR

Etrangement, même si on sait aujourd'hui que la vision Newtonienne de la gravité est incorrecte, ce résultat reste tout à fait valide dans le cadre de la théorie de la gravitation actuelle, la relativité générale, imaginée par Albert Einstein (en-

core lui) en 1915. Bien avant Einstein, on avait donc déjà imaginé la possibilité de l'existence de trous noirs, simplement à partir la loi d'attraction universelle de Newton. En relativité générale, la notion de trou noir reste similaire, mais s'y superposent des effets plus complexes, par exemple le problème de la singularité centrale ou la dilatation du temps à proximité de

l'horizon du trou noir (le rayon pour lequel la vitesse de libération est égal à la vitesse de la lumière), comme sur la planète de Miller dans le film *Interstellar*. Rappelez vous (attention, spoiler!) qu'après avoir passé une heure environ sur cette planète en orbite autour du trou noir supermassif Gargantua, Cooper et Amélia retrouvent leur copain Romilly qui a attendu... 23 ans à bord de la capsule spatiale! Le physicien et lauréat du prix Nobel Kip Thorne a conseillé les réalisateurs du film et vérifié le réalisme de la situation (même si elle est un peu extrême).

Ainsi, avec la théorie de la relativité générale, la gravitation n'est plus vue comme une action à distance instantanée entre deux masses, mais comme une déformation de la géométrie de l'espace et du temps par les masses ou toute autre forme d'énergie. Vous pourriez dire que tout cela est bien beau, mais

UNE MOISSON INTRIGANTE... ET DE DRÔLES HISTOIRES DE TROUS NOIRS.

Les premières observations d'ondes gravitationnelles ont été plutôt inattendues pour la plupart des astrophysiciens, qui y voient une opportunité pour réviser quelques contes de notre enfance.

L'ogre qui ne devait pas exister : On pensait que les trous noirs entre 60 et 150 masses solaires ne devaient pas exister (ou être extrêmement rares dans le bestiaire cosmique), parce qu'une étoile vraiment très massive explose en supernova sans laisser aucun reliquat. Or plusieurs observations de trous noirs dans ce supposé mass gap ont été réalisées (exemple: GW190521). Il se pourrait que de tels trous noirs proviennent de régions très denses en trous noirs (amas globulaires, noyaux actifs de galaxies), voire que l'origine des trous noirs soit toute autre, par exemple primordiale (trous noirs créés au moment du Big-Bang).

Le petit poucet et la patineuse qui ne tournait pas : Une autre observation inattendue a été réalisée le 14 août 2019 (GW190814). Il s'agit de la fusion d'un trou noir d'environ 23 masses solaires avec un objet compact moins massif (2.6 masse solaire) dont on ignore s'il s'agit d'une étoile à neutrons anormalement lourde ou d'un trou noir anormalement léger. D'autre part, le spin (c'est à dire la rotation) du trou noir le plus massif a pu être déterminé et est proche de zéro. C'est également inattendu car, comme une patineuse tourne de plus en plus vite en rapprochant ses bras du corps, le cœur d'une étoile en rotation s'effondrant en trou noir doit également tourner assez vite. La collaboration LIGO/Virgo en conclut que cette observation « remet en question tous les modèles actuels de formation et de distribution de masse de binaires d'objets compacts (ndlr: étoiles à neutrons et trous noirs stellaires) ».

Les lutins noirs : une analyse plus approfondie des données de LIGO/Virgo menée en 2021 par une équipe principalement belgo-néerlandaise, a révélé quatre candidats trous noirs plus légers qu'une fois la masse du soleil, sans pour autant apporter une preuve statistique suffisante de leur existence. Impossibles à créer à partir d'une étoile, de tels lutins noirs, s'il existent, suggéreraient l'existence de ces trous noirs primordiaux.

L'alchimiste de l'Univers : d'où vient l'or sur Terre? L'observation de GW170817, le 17 août 2017, apporte la réponse à cette question et confirme les modèles théoriques. Il s'agit de la fusion de deux étoiles à neutrons en un trou noir. En une seconde, environ 10 masses terrestres d'or et de platine sont produits lors de ce cataclysme cosmique. Cette observation permet de démontrer qu'environ 80% de l'or présent sur Terre devrait être issu de la fusion d'étoiles à neutrons, qui sont donc les alchimistes de l'Univers. Ce qui est inattendu, c'est qu'une seule observation de ce type a été réalisée à ce jour, alors que l'on pensait qu'elles constitueraient la majorité des observations.

La petite sirène : Quelques minutes à quelques heures après l'observation des ondes gravitationnelles de GW170817, d'autres signaux plus classiques (rayonnement gamma, optique et radio) sont observés dans la même région du ciel. Les ondes gravitationnelles permettent d'établir la distance de la source, alors que les signaux électromagnétiques permettent d'en établir le redshift (décalage vers le rouge). En combinant ces deux informations, on obtient une information sur le taux d'expansion de l'Univers, estimé à 70km/s/Mpc (voir article correspondant). On appelle ce type d'observation, combinant onde gravitationnelle et électromagnétique, une sirène standard, en hommage aux créatures mythologiques dont le chant attirait les marins dans la nuit.

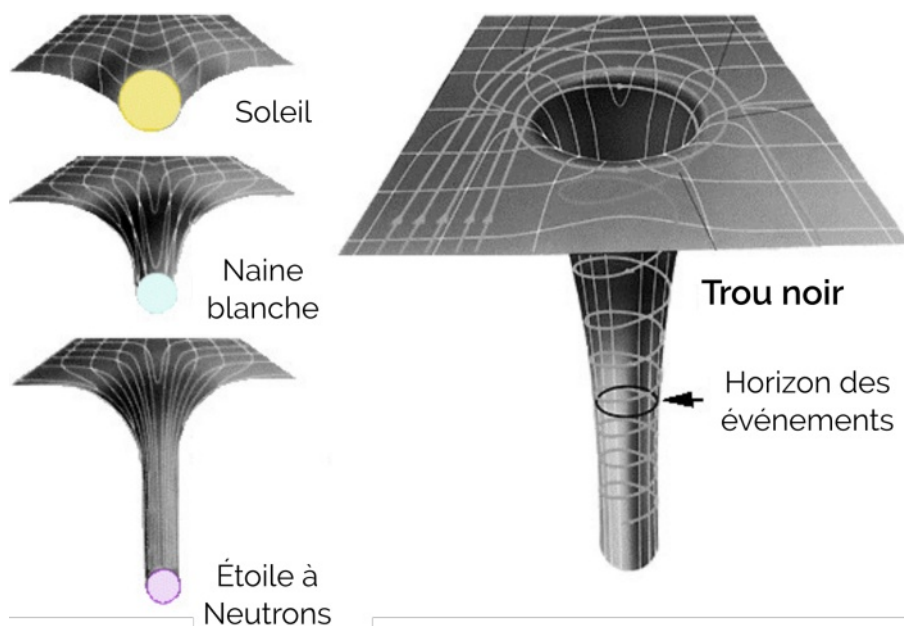
Pour en savoir plus sur les trous noirs et la physique d'Interstellar :

- Conférence de R. Lehoucq « Faire de la physique avec Interstellar »,



<https://www.youtube.com/watch?v=Nmd-bzGBpZdc>

- Fictions d'hier, Sciences d'aujourd'hui (RTBF-La Première), « Interstellar, trous noirs et trous de ver » : <https://www.rtbf.be/lapremiere/emissions/detail-fictions-d-hier-sciences-d-aujourd-hui/accueil/article-fictions-d-hier-sciences-d-aujourd-hui-interstellar-trous-noirs-et-trous-de-ver?id=10819622&programId=19535>



Source: <http://www.orionpx.fr/project/blog/les-etoiles-qui-sont-elles/gravite-trou-noir/>

qu'il est tout simplement impossible de comprimer la Terre dans un dé à coudre. C'est peut-être vrai pour la Terre, mais pas pour les étoiles massives. A la fin de leur vie, elles peuvent exploser en supernovae. Leur cœur dense peut alors s'effondrer en un trou noir (ou une étoile à neutron moins massive, selon les cas).

LIGO ET VIRGO. CHASSEURS DE TROUS NOIRS

Il arrive que deux trous noirs orbitant l'un autour de l'autre finissent par fusionner pour former un trou noir plus massif. Lors de cette valse infernale, les déformations de l'espace-temps prennent la forme

d'ondes se propageant dans l'Univers, appelées ondes gravitationnelles. Un shaker cosmique, en quelque sorte... Un interféromètre de Michelson peut détecter ces ondes gravitationnelles. A leur passage, l'espace est déformé et la longueur d'un bras augmente très légèrement alors que pour l'autre, elle diminue. Cela génère une légère différence de phase et donc une différence de luminosité au niveau du photo-détecteur. Mais cette variation est si infime que l'on

a besoin d'un interféromètre de plusieurs kilomètres de long, de miroirs massifs suspendus au bout d'un système complexe de pendules superposés, et d'une multitude de technologies de pointe, afin d'observer la fusion de deux trous noirs. La différence de longueur δL à détecter est de l'ordre de 10^{-18} m, soit un millième de la taille d'un proton! Deux interféromètres (LIGO) ont été construits aux Etats-Unis, un en Italie (Virgo), qui ont été récemment rejoints par

un détecteur japonais (KAGRA). Malgré les défis technologiques, la première observation de trous noirs a eu lieu le 14 septembre 2015 (voir signal ci-dessous). Une grande première couronnée du prix Nobel 2017! Depuis, près d'une centaine de fusions de trous noirs ou étoiles à neutrons ont été observées (voir tableau ci-dessous), révélant des propriétés inattendues. Aujourd'hui, l'astronomie des ondes gravitationnelles est en plein essor. Les observations remettent en cause les

PHOTOGRAPHIER UN TROU NOIR PRENDRE UNE PHOTO NETTE ET PAS TROP SOMBRE DE SA COPINE EN SOIRÉE. C'EST DÉJÀ PARFOIS COMPLIQUÉ...

Alors prendre une photo d'un trou noir, cela relève du défi. D'autant que photographier un de ces objets mystérieux peut sembler saugrenu étant donné qu'un trou noir, c'est... noir. Pourtant, un certain nombre d'informations utiles peuvent être extraites de la photo d'un trou noir. Quelle est sa masse? Possède-t-il un disque d'accrétion? Quelle est la forme et la dynamique de ce disque? Le trou noir tourne-t-il? Les lois de la relativité générale sont-elles respectées? Même si c'est un rêve pour les astrophysiciens, c'est surtout un réel challenge, car les trous noirs stellaires ne font que quelques kilomètres, moins que la résolution des meilleurs télescopes, alors que les trous noirs supermassifs, de la taille du système solaire, sont extrêmement lointains et ne se retrouvent qu'en exemplaire unique au cœur de chaque galaxie (et celui de notre galaxie, la Voie Lactée, est caché par une grande quantité de poussière, pas la cible idéale donc). Le rêve est pourtant devenu réalité le 10 avril 2019, avec la première photographie d'un trou noir supermassif, M87*, un monstre de sept milliards de fois la masse du soleil au centre de la galaxie Messier 87, à 50 millions d'années lumière de la Terre. La prouesse est réalisée par la collaboration EHT (pour Event Horizon Telescope), comprenant plusieurs radiotélescopes (de grandes antennes radio) répartis à travers le monde, afin d'obtenir un instrument dont le pouvoir de résolution est comparable à un télescope de la taille de la Terre.

La « photographie » obtenue est parfaitement compatible avec les lois de la relativité. On y voit le disque de gaz tournoyant autour du trou noir. La région sombre centrale n'est pas l'horizon du trou noir mais une région d'ombre prédite par la relativité. Elle est causée par la capture d'une grande partie des rayons lumineux, qui suivent la courbure de l'espace-temps et tombent dans le trou noir.

L'horizon lui-même est 2,5 fois plus petit que cette région sombre. L'asymétrie de l'image est aussi un effet relativiste qui a permis de déterminer l'orientation, le sens et la vitesse de rotation du disque d'accrétion. Ce n'est sans doute que le premier exploit de ce genre, et d'autres trous noirs pourront être photographiés dans les années à venir. Avec, peut-être, de grandes découvertes à la clé. Avis aux jeunes photographes amateurs...





Vue aérienne de l'interféromètre Virgo, près de Pise, en Italie. Chaque bras mesure environ 3km.

modèles astrophysiques que l'on pensait bien établis et des hypothèses plus exotiques sont envisagées (voir point suivant).

Sept universités belges (dont l'ULB) sont impliquées dans la collaboration LIGO/Virgo, tant pour la conception instrumentale, l'analyse des données et les modèles théoriques de trous noirs et d'étoiles à neutrons.

TÉLESCOPE EINSTEIN: UN SUPER-DÉTECTEUR D'ONDES GRAVITATIONNELLES EN BELGIQUE?

Avec LIGO et Virgo, c'est de la chasse à l'affût. On attend parfois plusieurs jours pour qu'une onde gravitationnelle d'amplitude suffisamment importante ne secoue les détecteurs. Mais les physiciens ne se reposent pas sur leurs lauriers, et préparent déjà la future génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles, qui observeront jusqu'à cent mille fusions de trous noirs chaque année.

L'un d'eux devrait s'établir en Europe et consistera en un méga-in-

terféromètre aux bras longs de 10 km, à 300 mètres sous terre pour s'affranchir du bruit sismique environnant. Un instrument aussi grand que le grand collisionneur de hadrons, le LHC, au CERN (qui est la plus grande expérience de physique sur Terre). Deux sites sont envisagés pour accueillir le monstre: en Sardaigne (Italie) ou à la frontière entre l'Allemagne, les Pays-Bas et... la Belgique.

Des développements technologiques majeurs devront être

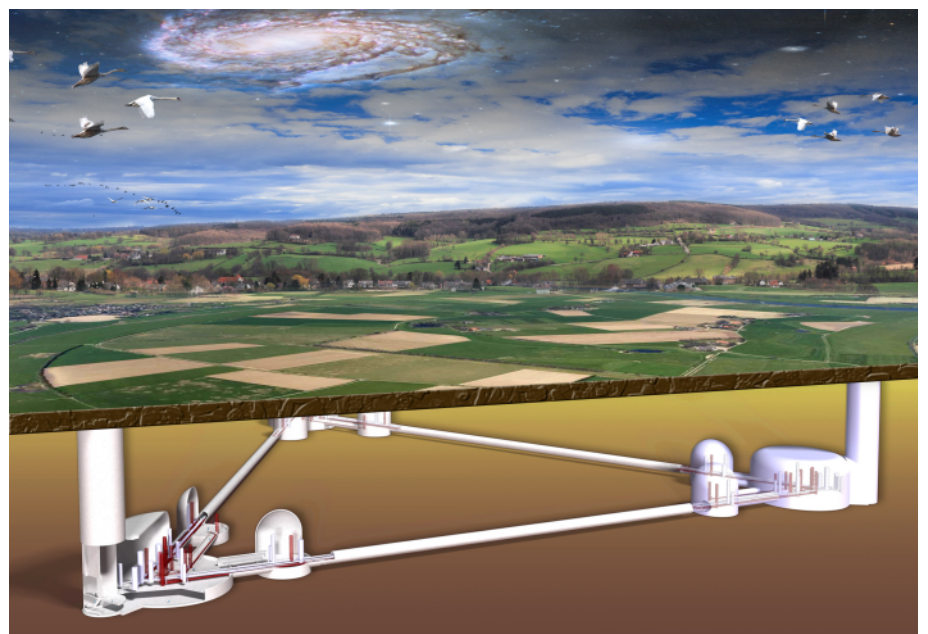


Illustration du futur télescope Einstein.

réalisés d'ici là, qui auront probablement bien plus que des retombées scientifiques. Pour la construction du Télescope Einstein, l'analyse et l'exploitation des données, nous aurons besoin de physiciens, ingénieurs, techniciens, informaticiens, mathématiciens, data scientists, tunneliers, etc. Avis aux jeunes!

MORT PAR TROU NOIR!

La conquête de l'espace offre de nouvelles perspectives en matière de... criminalité. En particulier, les trous noirs pourraient se révéler être une arme idéale pour un crime quasi parfait.

Une matière que vous devrez étudier si vous souhaitez devenir le plus grand détective de la galaxie et rejoindre le futur SBI (Space Bureau of Investigation), la police interplanétaire AstroPol ou la prestigieuse agence de détectives Galactic Murder Solvers.

1. La machine à spaghettis Que se passe-t-il lorsque l'on s'approche trop près de l'horizon d'un trou noir? Si celui-ci n'est pas trop gros (par exemple un trou noir de quelques kilomètres et plusieurs fois la masse du soleil, issu d'une supernova), la force de marée exercée par le trou noir sera tellement intense qu'elle brisera les molécules de la pauvre victime qui sera réduite en... spaghetti géant! Cette force de marée, ce n'est rien d'autre que la différence entre la force gravitationnelle exercée au pieds de la victime, plus proches du trou noir, et celle exercée au niveau de la tête, qui en est plus éloignée.

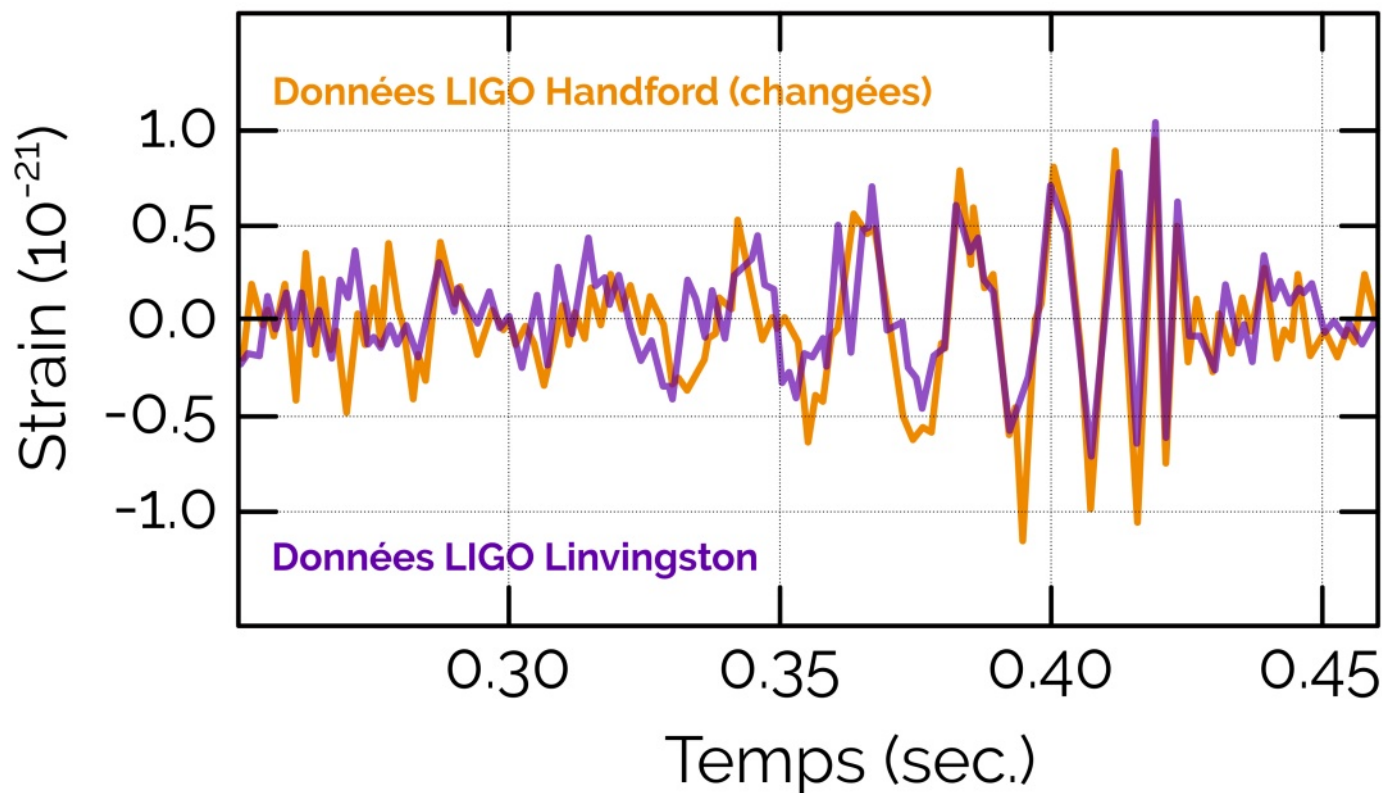
Un excellent moyen de torture et une méthode de choix pour réduire un corps en simples atomes.

2. L'armoire à disparaître Si c'est un très gros trou noir, comme les trous noirs supermassifs (jusqu'à plusieurs milliards de fois la masse du soleil) que l'on retrouve au centre des galaxies, les forces de marée sont moins importantes et l'on peut aisément franchir l'horizon du trou noir sans pour autant être spaghettifié.

Par contre, une fois à l'intérieur, aucun moyen d'en ressortir, ni d'envoyer un SOS. Et gare à la singularité au centre du trou noir, où la densité devient infinie. Mais avec un peu de chance, la victime pourrait être sauvée par de nouvelles lois de la physique se manifestant dans ces conditions extrêmes. Ce serait donc un moyen gentil et délicat de faire disparaître quelqu'un de notre Univers sans pour autant le tuer. Attention toutefois que l'image de la victime juste avant qu'elle ne franchisse l'horizon pourra mettre très longtemps à ressortir. On pourra donc « voir » la victime chuter longtemps encore après qu'elle a franchi l'horizon. La fréquence de la lumière diminuera lors de son trajet, la victime deviendra donc toute rouge, puis infrarouge, puis un signal radio, jusqu'à devenir indétectable. Cette méthode criminelle laisse donc des traces et l'on pourrait imaginer déterminer le jour et l'heure du délit en mesurant la fréquence à laquelle on observe la victime tomber dans le trou noir.

3. Des mini trous noirs primordiaux? A l'inverse, des trous noirs beaucoup plus petits et moins massifs pourraient s'être formés une fraction de seconde après le Big-Bang, à partir d'inhomogénéités dans la soupe chaude primordiale qui remplissait l'Univers. Ces objets hypothétiques sont appelés des trous noirs primordiaux, et pourraient avoir aujourd'hui des masses très variables, allant d'un petit astéroïde à celle des trous noirs supermassifs. Ils sont d'ailleurs un candidat possible aux observations de LIGO/Virgo, ou pour expliquer l'origine de ces fameux trous noirs supermassifs. Si des mini trous noirs primordiaux existent, il pourraient être très nombreux dans le système solaire. Si l'un d'entre eux nous transperçait, à la vitesse de plusieurs centaines de km/s, on pourrait naïvement penser qu'il ne provoquerait qu'une blessure cylindrique microscopique relativement mineure.

C'est sans compter l'effet de la gravité intense du trou noir. Avi Loeb, astrophysicien à l'Université d'Harvard, décrivait la sensation probable dans un article de vulgarisation publié en 2021 dans le Scientific American: « The attractive gravitational force (...) would shrink our entire body by several inches during its quick passage. The resulting pain would feel as if a tiny vacuum cleaner with a tremendous suction power went quickly through our body and shrunk its muscles, bones, blood vessels and internal organs. The dramatic bodily distortion would create severe damage and cause immediate death ». Heureusement, la probabilité d'un tel événement est extrêmement faible. Mais on pourrait imaginer prendre le contrôle de la fusée de quelqu'un pour la diriger intentionnellement vers un tel trou noir. Un nouveau crime spatial à ne pas négliger par les futurs détectives de l'espace.



Signal détecté le 14 septembre 2015, simultanément dans les interféromètres LIGO situés à Hanford et Livingston, aux Etats-Unis. Le « strain » de l'onde gravitationnelle peut être vu comme la variation de longueur relative des bras du détecteur, $\delta L / L$. L'onde gravitationnelle provient de la fusion de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires en un trou noir de 62 masses solaires, à environ un milliards d'années lumière de la Terre.

En un dixième de seconde, l'équivalent d'environ 3 masses solaires se sont donc « évaporées », sous la forme d'ondes gravitationnelles.

DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

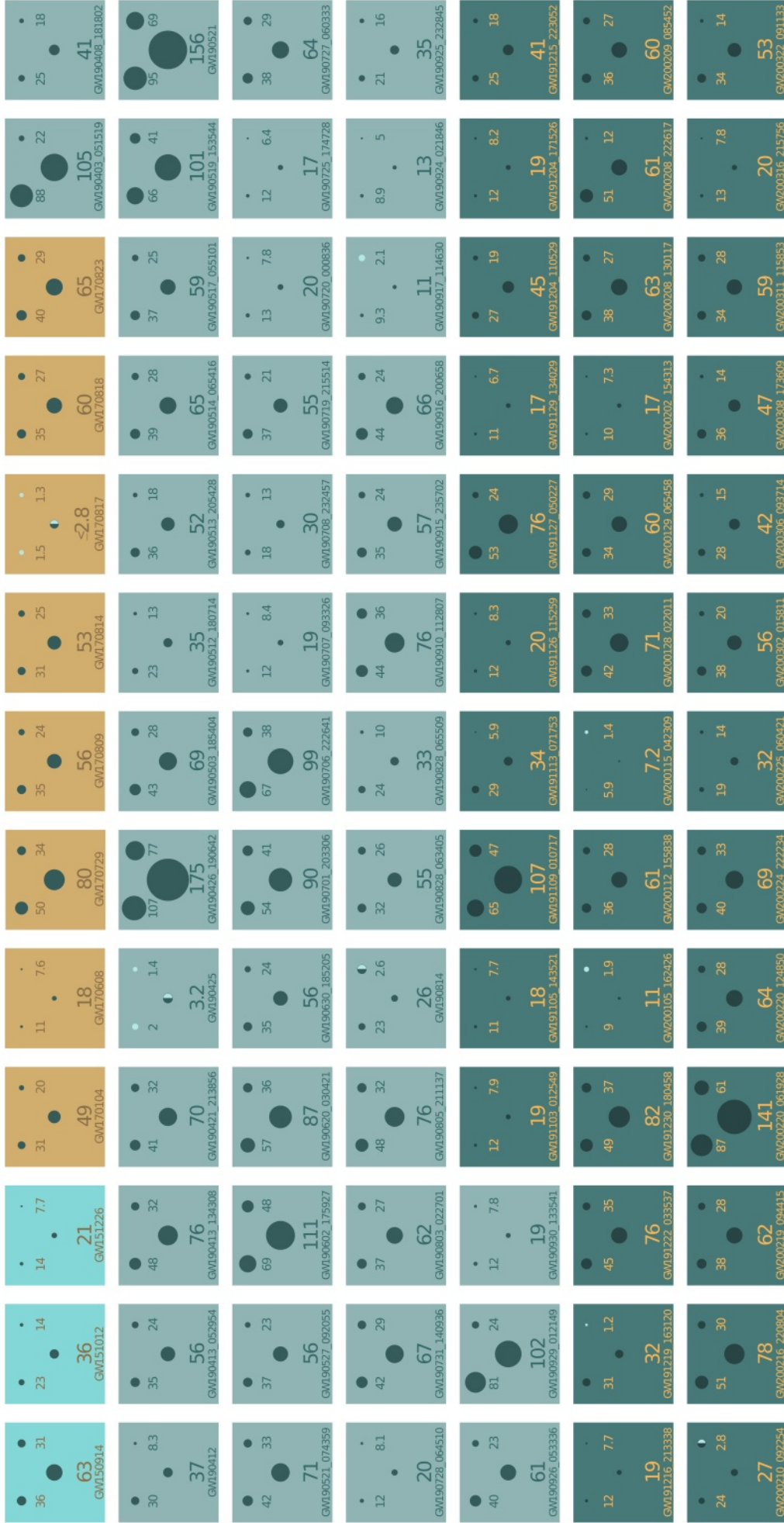
DEPUIS 2015

PÉRIODES
D'OBSERVATION

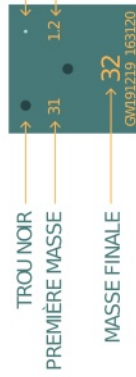
01 2015-2016

02 2016-2017

03a+b 2019-2020



LÉGENDE



TROU NOIR
PREMIÈRE MASSE

MASSE FINALE

ÉTOILE À NEUTRONS
(NU AVEC UN GROSSISSEMENT $\times 10$)
● ASTRE INDÉTERMINÉ

SECONDE MASSE
DATE (HEURE)

LES UNITÉS SONT
EN MASSE SOLAIRE

1 MASSE SOLAIRE = 1.989×10^{30} KG

L'estimation des masses n'induit pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois être supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale reste toujours inférieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné.

Les événements recensés ici ont passé un des 2 critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.



AAC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery

