

Amélioration de la mesure de l'expansion de l'Univers avec les ondes gravitationnelles

Daté du 8 novembre 2021. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3Cosmology>.

Plus d'informations en français : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>.

Introduction

Dans une récente publication des collaborations LIGO-Virgo-KAGRA, nous mesurons le taux d'expansion de l'Univers en utilisant 47 sources d'ondes gravitationnelles du catalogue Gravitational-Wave Transient Catalog (GWTC-3). L'étude de ces signaux permet d'estimer les distances de ces 47 sources, qui sont des fusions de deux astres compacts, **trou noir** ou **étoile à neutrons**. On peut obtenir une information sur leur **décalage vers le rouge** à partir de la distribution de leurs masses ou en utilisant la distribution des décalages vers le rouge des galaxies du catalogue **GLADE+**. En combinant mesures de distances et informations sur le décalage vers le rouge, on en déduit une mesure sensiblement améliorée de la **constante de Hubble**, qui caractérise le taux d'expansion de l'Univers. Avec les futures détections d'ondes gravitationnelles dans les prochaines années, on peut espérer que notre nouvelle méthode de mesure de la constante de Hubble sera assez précise pour aider à comprendre le désaccord actuel entre les résultats obtenus par des méthodes différentes basées sur des signaux électromagnétiques.

Généralités sur la cosmologie et les ondes gravitationnelles

Dans les années 1920, Georges Lemaître et Edwin Hubble ont découvert que l'Univers était en expansion (comme illustré par la Figure 1). Cette découverte majeure a révolutionné notre compréhension de l'Univers et a donné naissance à la **théorie du Big Bang**, pilier de la cosmologie moderne.

Le taux d'expansion local de l'Univers est mesuré via la constante de Hubble, dont la valeur actuelle, notée H_0 , est exprimée en kilomètres par seconde et par **Mégaparsec** (Mpc). Cependant, même après un siècle d'efforts expérimentaux, sa valeur n'est toujours pas déterminée de façon très précise. Il existe des incompatibilités entre des mesures pourtant très soignées, basées sur différentes méthodes. Par exemple, on peut estimer la constante de Hubble en exploitant la première lumière de l'Univers alors qu'il n'était âgé que de 380 000 ans, c'est le **rayonnement fossile**, et cette méthode donne une valeur de $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. On peut également étudier la luminosité des **supernovæ de type Ia** ou d'étoiles variables comme les **Céphéides**, ce qui donne une valeur de $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Ces deux valeurs semblent proches mais elles sont incompatibles au regard de leurs incertitudes associées et ce désaccord est trop important pour être attribué aux inévitables fluctuations aléatoires des mesures. Cette différence est actuellement un problème majeur en cosmologie moderne.



Figure 1 : Représentation schématique de l'expansion de l'Univers. À mesure que le temps passe, les galaxies s'éloignent les unes des autres comme si elles étaient posées sur la surface d'un ballon qui gonfle de plus en plus. (Crédits : Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb).

En 2015, nous avons ouvert une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers, basée sur les ondes gravitationnelles (produites par des masses accélérées) et indépendante des ondes électromagnétiques (produites par le déplacement de charges électriques). Les ondes gravitationnelles sont des frémissements (ou perturbations) de l'espace-temps. Elles ont été prédites par Albert Einstein en 1917 et leur observation est une remarquable confirmation de sa théorie de la [relativité générale](#). Parmi les sources les plus intenses d'ondes gravitationnelles dans l'Univers, on peut penser à des couples d'astres compacts, trous noirs ou étoiles à neutrons, en interaction gravitationnelle au sein d'un système binaire. Lors de leurs déplacements l'un autour de l'autre, ces astres perdent de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles. En conséquence, leur orbite accélère et se réduit jusqu'à la fusion du système binaire. Si l'on observe le signal d'onde gravitationnelle émis lors d'une telle fusion, l'analyse de sa forme ainsi que son évolution dans le temps nous permet de [mesurer directement la distance qui nous en sépare](#) (lien en anglais). En comparaison, les méthodes plus traditionnelles basées sur la lumière (les Céphéides ou les supernovæ de type Ia mentionnées précédemment) pour mesurer les distances cosmologiques sont *indirectes* et reposent sur des étapes successives de calibration, que les astronomes appellent **l'échelle de distance cosmique**.

Cette propriété des ondes gravitationnelles d'être des indicateurs directs de distances cosmologiques permet d'éviter le recours à l'échelle cosmique, ce qui les rend extrêmement intéressantes ; on les appelle des [sirènes standard](#) (lien en anglais). Si la mesure directe de distance d'une sirène standard peut être complétée par une information indépendante sur son [décalage vers le rouge](#), alors on peut mesurer la constante de Hubble.

Basculons vers le côté obscur ...

Quand les deux astres compacts sont des étoiles à neutrons et que l'on observe une contrepartie électromagnétique (optique notamment), le décalage vers le rouge de la galaxie hôte est facile à mesurer puisqu'elle est connue ! Le premier système binaire d'étoiles à neutrons détecté en ondes

gravitationnelles est [GW170817](#) et une contrepartie électromagnétique a également été observée. Ceci a permis d'identifier la galaxie hôte : NGC4993 et son décalage vers le rouge, utilisé conjointement avec la distance mesurée par le signal d'ondes gravitationnelles a été la [première mesure de la constante de Hubble avec une sirène standard](#).

Malheureusement, la plupart des systèmes binaires sources d'ondes gravitationnelles (en particulier quand il s'agit de deux trous noirs), n'émettent pas de signal électromagnétique. Cependant, il est tout de même possible d'exploiter le signal détecté pour obtenir une information indirecte sur le décalage vers le rouge de sa source.

Tout d'abord, dans le cas d'un système binaire formé de deux trous noirs, on peut utiliser le fait que leurs masses sont mesurées sur Terre, dans le système de référence de nos détecteurs LIGO et Virgo. Or ces masses mesurées sont décalées vers le rouge par l'expansion de l'Univers : elles semblent plus importantes qu'elles ne le sont en réalité, tout comme la lumière émise par une galaxie lointaine nous semble avoir une longueur d'onde plus grande, toujours vue dans notre système de référence. Cela signifie que la distribution des masses des trous noirs détectés par ondes gravitationnelles peut fournir des informations sur la distribution des décalages vers le rouge des sources. On peut alors combiner cette information avec les distances mesurées pour mesurer la constante de Hubble.

Ensuite, on peut utiliser les ondes gravitationnelles détectées pour contraindre la zone de l'Univers d'où le signal a dû être émis (en trois dimensions : position dans le ciel et distance) et ainsi limiter les galaxies hôtes possibles à celles présentes uniquement dans cette région. Connaissant les décalages vers le rouge de ces galaxies, on peut alors mesurer H_0 de manière statistique (une méthode proposée par Bernard Schutz dans son article fondateur de 1986).

On voit donc que les observations d'ondes gravitationnelles, même en l'absence de contrepartie électromagnétique (et donc "sombres"), peuvent être utilisées comme sirènes standard sombres.

Sur quoi reposent les analyses ?

Nous allons maintenant expliquer plus en détail comment on peut utiliser les masses mesurées (celles qui sont décalées vers le rouge, c'est-à-dire affectées par l'expansion de l'univers) pour estimer la constante de Hubble. Pour cela, on se restreint aux données des fusions de deux trous noirs.

Une première méthode consiste à supposer que les masses des trous noirs dans l'Univers suivent une distribution présentant un pic¹, produit par un processus physique lié à leur création. Et on a de bonnes raisons théoriques de penser qu'un tel pic existe. Par exemple, il est théoriquement prédit que les trous noirs stellaires pourraient avoir une masse maximale au-delà de laquelle l'étoile

¹ Dans le jargon scientifique, un "pic" dans une distribution est une valeur, ou un ensemble de valeurs, qui reviennent plus fréquemment que leurs voisins dans le lot de données étudié. Et donc [l'histogramme](#) construit à partir de l'ensemble de ces données présente une bosse autour de ces valeurs : le pic. Par exemple, cette [pyramide des âges](#) (Espagne, 2016) présente un pic autour de 40 ans.

exploserait avec une violence telle qu'il n'existerait plus rien après : c'est le phénomène de **supernova par production de paires**. Bien que nous ne puissions que mesurer les masses décalées vers le rouge de chacun des deux trous noirs des systèmes binaires considérés, nous pouvons nous attendre à ce que leur distribution observée garde une trace du pic attendu, qui sera lui aussi décalé vers le rouge. Par conséquent, le pic observé dans la distribution des masses de trous noirs contient une information sur leur décalage moyen vers le rouge, une information que nous pouvons exploiter conjointement avec les estimations des distances pour mesurer le taux d'expansion de l'Univers.

Notre deuxième façon de mesurer H_0 utilise le catalogue de galaxies GLADE+ qui contient de nombreuses informations (décalage vers le rouge, luminosité, couleur...) pour des millions de galaxies situées dans la même région de l'Univers que la Voie Lactée. Comme les ondes gravitationnelles détectées nous informent sur les régions du ciel d'où elles proviennent ainsi que sur les distances des sources, nous pouvons, pour chaque signal, nous restreindre à une partie seulement du catalogue GLADE+ pour chercher les galaxies potentiellement hôtes de sa source. Cette correspondance n'est que probabiliste car la détermination de la position de la source n'est généralement pas très précise : il y a donc de nombreuses galaxies hôtes candidates, chacune d'elles ayant une certaine probabilité d'être réellement hôte de la fusion du système binaire. La détermination des galaxies candidates dépend aussi de la constante de Hubble puisqu'elle entre en jeu dans la relation entre distance et décalage vers le rouge. Il faut aussi prendre en compte le fait que le catalogue de galaxies n'est pas complet : il ne contient pas toutes les galaxies présentes dans le volume d'Univers observé ; par exemple, celles qui sont trop petites ou trop peu lumineuses pour être détectées n'y figurent pas. Il est néanmoins possible de préciser le décalage vers le rouge des sources d'ondes gravitationnelles observées et donc, en utilisant l'estimation de leur distance, de mesurer H_0 .

Explications sur nos analyses

Notre publication présente les résultats des deux approches décrites précédemment en utilisant les événements du catalogue GWTC-3 : la méthode utilisant la distribution des masses des trous noirs détectés et celle basée sur le catalogue de galaxies.

Pour la méthode exploitant les masses des trous noirs, nous avons pu pour la première fois contraindre conjointement les propriétés des trous noirs détectés et les paramètres cosmologiques qui déterminent l'expansion de l'Univers. En pratique, notre analyse estime non seulement la constante de Hubble mais également les quantités de **matière noire** et d'**énergie noire** dans l'Univers, des ingrédients essentiels dans le modèle standard de la cosmologie, noté [Lambda CDM](#). Cependant, les données de GWTC-3 ne permettent pas de contraindre avec précision les abondances de matière noire et l'énergie noire. Ce n'est pas surprenant puisque ces quantités sont surtout mesurables à l'aide de trous noirs situés à plus grande distance que ceux figurant dans le catalogue GWTC-3. Mais ces résultats sont tout de même encourageants pour le futur, lorsque les détecteurs seront plus sensibles et capables de détecter des signaux de fusion de trous noirs à plus grande distance.

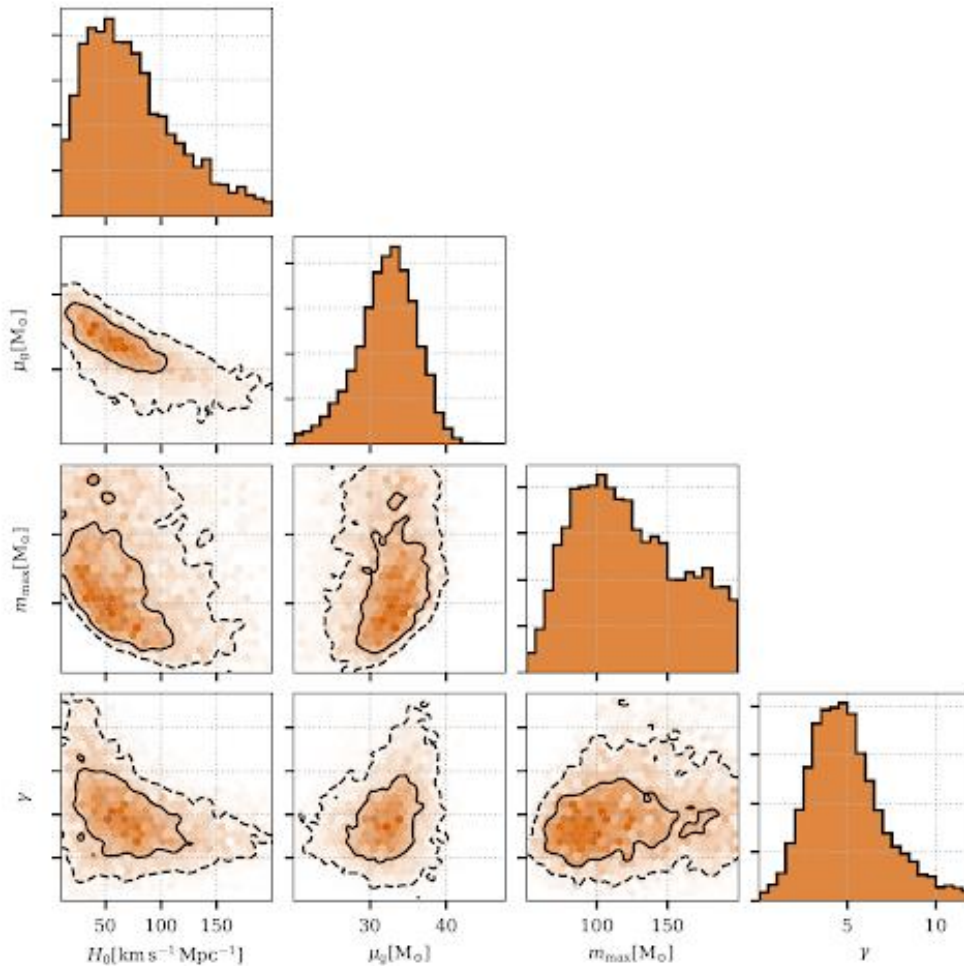


Figure 2 (c'est la Figure 5 de notre article) : **Distributions postérieures de probabilité** pour les valeurs de la constante de Hubble (H_0) et les trois autres paramètres utilisés pour décrire notre modèle de distribution des masses des trous noirs dans les systèmes binaires. Ces distributions sont obtenues de manière globale, à partir de l'analyse basée sur les masses des trous noirs observés dans le catalogue GWTC-3. Sur chaque ligne, le graphique le plus à droite montre la distribution de probabilité d'un de ces paramètres ; en particulier, la distribution pour H_0 se trouve tout en haut de la figure. Les autres graphiques montrent la probabilité jointe de chacune des paires de paramètres. Les courbes en trait plein délimitent les régions qui ont une probabilité de 50% de contenir les vraies valeurs de ces paramètres ; celles en trait pointillé montrent les régions correspondantes, cette fois-ci pour une probabilité de 90%.

Les résultats sur la constante de Hubble obtenus avec la méthode basée sur les masses des trous noirs sont plus informatifs. La Figure 2 montre les contraintes obtenues sur H_0 et les paramètres du modèle de population des trous noirs. On voit que, pour ce modèle de population, nos données favorisent des valeurs plutôt faibles de la constante de Hubble. Quand on ajoute l'information sur H_0 obtenue avec [l'événement gravitationnel GW170817 et sa contrepartie électromagnétique](#), on trouve $H_0 = 68^{+13}_{-7} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ce qui représente une amélioration plus précise de 13% par

rapport au [résultat précédemment publié](#) (lien en anglais) à partir des données gravitationnelles de notre premier catalogue [GWTC-1](#).

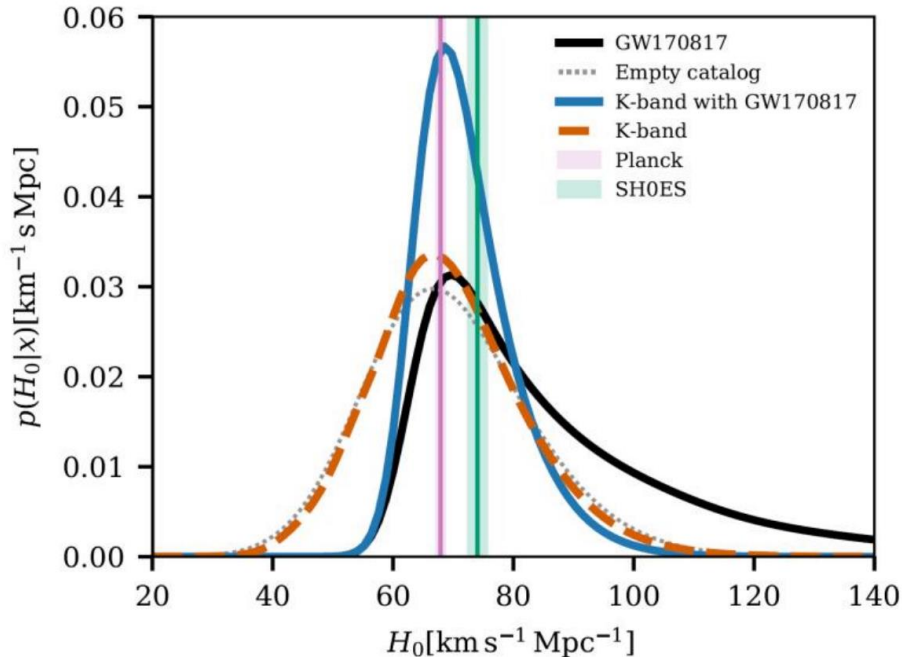


Figure 3 : (c'est la Figure 8 de notre article) : **Distributions postérieures de probabilité** de la constante de Hubble (H_0), correspondant à différentes analyses. Chaque distribution de probabilité est une courbe indiquant la meilleure estimation de H_0 obtenue après analyse. La courbe noire pleine est l'estimation fournie par GW170817, la fusion d'étoiles à neutrons avec contrepartie électromagnétique observée. La ligne bleue pointillée est le résultat correspondant à l'analyse basée sur les masses des trous noirs (donc sans catalogue de galaxies). Les courbes bleue et en pointillés oranges montrent les résultats obtenus par l'analyse basée le catalogue de galaxies, avec et sans inclure l'événement GW170817. Remarque : on utilise la bande K du catalogue de galaxies, qui rassemble les luminosités dans une gamme particulière de longueurs d'onde, centrée dans l'infrarouge. Les deux bandes verticales (magenta et verte) donnent les estimations de H_0 obtenues par l'observation du rayonnement fossile (CMB, données de Planck) et des Supernovæ + Céphéides (SH0ES), respectivement.

Les résultats obtenus avec la seconde méthode, en utilisant le catalogue de galaxies GLADE+, sont également encourageants. Dans ce cas, on doit faire une hypothèse sur les propriétés des trous noirs qui fusionnent. On considère pour cela les paramètres du meilleur modèle obtenu pour les fusions de trous noirs observées ; ce modèle contient une [loi de puissance](#) ainsi qu'un [pic gaussien](#) pour décrire la [distribution des masses des trous noirs](#). En exploitant l'information de GLADE+ avec ces paramètres fixés pour la population de trous noirs, on trouve $H_0 = 68^{+8}_{-6} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ce qui représente une amélioration de 41% par rapport au résultat obtenu avec le catalogue gravitationnel GWTC-1. Ce nouveau résultat est présenté sur la Figure 3 dans laquelle on voit que notre valeur de H_0 est compatible à la fois avec les mesures obtenues avec le **fond diffus cosmologique** (CMB, bande verticale magenta) et avec celles des supernovæ de type Ia et des

Céphéides (bande verticale verte) ; sa précision actuelle est cependant insuffisante pour résoudre le désaccord entre les deux méthodes électromagnétiques.

Résumé et étapes futures

Les contraintes sur la constante de Hubble obtenues dans cette nouvelle analyse sont meilleures que celles publiées précédemment ; elles dépendent du modèle utilisé pour décrire la population de trous noirs qui ont fusionné. Pour presque tous les événements du catalogue GWTC-3 analysés avec la méthode basée sur le catalogue GLADE+, les résultats sont fortement dépendants des hypothèses faites sur le modèle de population de trous noirs, sauf pour l'événement [GW190814](#) dont la position dans le ciel est bien mieux déterminée que pour les autres sources : les galaxies du catalogue GLADE+ candidates pour être l'hôte de cette source fournissent des informations très utiles sur la constante de Hubble.

Dans les prochaines années, la sensibilité des détecteurs [LIGO](#) et [Virgo](#) sera améliorée. Un détecteur supplémentaire, [KAGRA](#), devrait entrer en fonction fin 2022 pour notre [prochaine prise de données commune O4](#) et devrait être suivi plus tard (vers la fin de cette décennie) par [LIGO India](#). On s'attend à ce que cette amélioration du réseau de détecteurs fournisse de nombreux nouveaux événements bien localisés dans le ciel. On peut donc espérer avec confiance une meilleure détermination de la constante de Hubble dans le futur, en particulier si le catalogue de galaxies est plus complet jusqu'à des décalages vers le rouge plus grands que ce que nous utilisons aujourd'hui.

Avec l'augmentation attendue du rythme de détections d'ondes gravitationnelles dans les prochaines années, on peut également espérer de meilleurs résultats avec la méthode basée sur la distribution des masses de la population de trous noirs. Dans quelques années, on peut envisager d'analyser les données de façon à mesurer simultanément les propriétés de la population des trous noirs (en prenant en compte des modèles plus généraux que ceux considérés dans cette publication) et les paramètres du modèle standard cosmologique (constante de Hubble bien sûr mais aussi les abondances de la matière noire et de l'énergie noire). Le futur s'annonce très prometteur pour la cosmologie basée sur les ondes gravitationnelles !

Glossaire

- **Céphéide** : Type particulier d'étoile variable, dont la taille et la température changent périodiquement, ce qui entraîne également une variation périodique de sa [luminosité](#). En mesurant la période de pulsation d'une Céphéide, les astronomes peuvent calculer précisément sa distance.
- **Constante de Hubble** : Paramètre utilisé pour mesurer le taux d'expansion de l'Univers. Sa valeur actuelle est notée H_0 et vaut environ $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Voir également [ici](#).
- **Décalage vers le rouge** (redshift en anglais) : Augmentation de la longueur d'onde (du son, de la lumière ou des ondes gravitationnelles) due au déplacement de la source de l'onde par rapport à l'observateur. Avec l'[expansion cosmologique de l'Univers](#), des objets

tels que les galaxies s'éloignent de nous et la lumière qui en provient est décalée vers une longueur d'onde plus importante (et donc vers la couleur rouge pour la lumière visible).

- **Distribution postérieure de probabilité** : Variation du niveau de probabilité des valeurs possibles de la quantité physique étudiée (par exemple la valeur de la constante de Hubble H_0), fournie par une méthode statistique d'analyse des données appelée [inférence Bayésienne](#).
- **Échelle de distance cosmique** : C'est l'ensemble des méthodes utilisées par les astronomes pour mesurer les distances dans l'Univers. Les distances des objets lointains, qui sont en général déduites de leurs propriétés intrinsèques, sont obtenues de proche en proche par des mesures de distance plus directes, géométriques, d'objets proches, typiquement dans notre Galaxie. Pour plus d'informations, voir [ici](#).
- **Énergie noire** : Constituant mystérieux et inconnu de l'Univers mais qui serait dépositaire de la majorité de son énergie. L'énergie noire gouvernerait le comportement actuel de l'Univers à grande échelle et serait notamment responsable de l'[accélération de l'expansion de l'Univers](#). Le modèle le plus simple d'énergie noire est le cas d'une [constante cosmologique](#) se comportant comme un fluide à pression négative, à l'origine d'une accélération de l'expansion de l'Univers.
- **Étoile à neutrons** : Résidu de l'explosion (supernova) d'une étoile de 10-25 masses solaires. Les étoiles à neutrons ont en général une masse de 1 ou 2 masses solaires pour un rayon de 10-15 kilomètres, ce qui les classe parmi les objets les plus denses jamais découverts.
- **Fond diffus cosmologique** (Cosmic Microwave Background, **CMB**, en anglais) : Rayonnement électromagnétique produit lorsque l'Univers est devenu transparent alors qu'il n'était âgé que d'environ 380 000 ans. Le CMB est aussi connu sous le nom de "rayonnement fossile", en tant que témoin de la période dense et chaude de l'Univers. Pour plus d'informations, voir [ici](#).
- **GLADE+** : Nouvelle compilation élargie de catalogues de galaxies, contenant au total environ 22 millions de galaxies, utilisées pour estimer le décalage vers le rouge des potentielles galaxies hôtes des sources d'ondes gravitationnelles. Un article librement accessible décrivant le catalogue initial GLADE est disponible [ici](#).
- **Matière noire** : Forme hypothétique de matière qui constituerait pourtant 85% de la masse dans l'Univers. On l'appelle noire car elle n'émet aucune lumière et n'interagit pas électromagnétiquement. De nombreuses théories de la matière noire prédisent qu'il s'agirait d'un nouveau type de particule fondamentale ; il est également possible que les objets les plus sombres que nous connaissons (les trous noirs !) constituent aussi en partie la matière noire.
- **Mégaparsec** : Unité de distance fréquemment utilisée en astronomie. Un mégaparsec vaut un million de parsecs et un [parsec](#) vaut environ 3,25 années-lumière, soit $3,086 \times 10^{16}$ mètres.
- **Rayonnement fossile** : Voir l'entrée "Fond diffus cosmologique".
- **Supernova de type Ia** : Mécanisme d'explosion particulier d'une naine blanche accrétant de la masse à partir d'une étoile compagnon de type super géante rouge, jusqu'à ce que sa masse dépasse la [limite de Chandrasekhar](#) d'1,4 fois la [masse du Soleil](#). La distance d'une Supernova de type Ia peut être estimée avec confiance car le processus menant à son

explosion est universel : la [luminosité](#) intrinsèque de la source est donc constante, ce qui en fait une excellente [chandelle standard](#).

- **Supernova par production de paires** : type d'explosion en supernova attendu pour des étoiles de masses supérieures à 130 masses solaires. La production de [paires électron-positron](#) dans le cœur de l'étoile engendre une forte diminution de la pression de radiation qui permettait à l'étoile de rester à l'équilibre. L'effondrement est donc inévitable et l'explosion thermonucléaire se produit avec une violence telle qu'il ne reste pas de résidu après.
- **Théorie du Big Bang** : Théorie rendant compte de l'origine et de l'évolution de l'Univers, né il y a environ 14 milliards d'années et en expansion depuis lors à partir d'un état extrêmement dense et chaud. Cette théorie est aujourd'hui très largement acceptée grâce à sa capacité à expliquer un très grand nombre de propriétés observées de l'Univers, en particulier l'[abondance des éléments chimiques légers](#) ainsi que l'existence du [fond diffus cosmologique](#). Voir également [ici](#).
- **Trou noir** : C'est une région de l'espace-temps qui contient une masse tellement compacte que sa gravité empêche tout objet, même de masse nulle (comme la lumière), de s'en extraire.

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet
 - [LIGO](#)
 - [Virgo](#)
 - [KAGRA](#)



- Liens vers les communiqués de presse
 - [Virgo Website GWTC-3 news](#)
 - <https://www.ligo.org/news/index.php#GWTC3>
- Lisez gratuitement l'article scientifique complet [ici](#)
- Les données de O3b rendues publiques sont disponibles via le portail internet www.gw-openscience.org/GWTC-3.