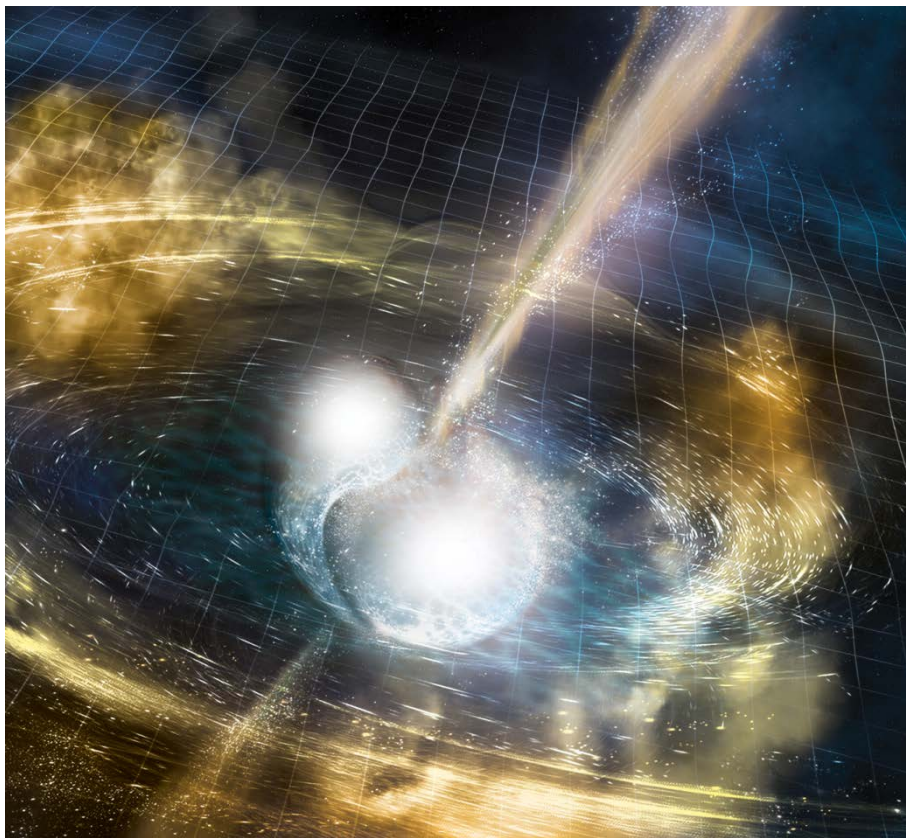


## MESURE DE L'EXPANSION DE L'UNIVERS GRACE AUX ONDES GRAVITATIONNELLES

En août 2017, pour la toute première fois, Advanced LIGO et Advanced Virgo ont détecté des ondes gravitationnelles provenant de la fusion d'un couple d'étoiles à neutrons. Cet événement sans précédent a également été observé très largement en lumière sur l'ensemble du spectre électromagnétique, permettant d'identifier la galaxie hôte de la source d'ondes gravitationnelles. En combinant la distance de la galaxie mesurée à partir des données gravitationnelles avec sa vitesse radiale déterminée à partir des données électromagnétiques, nous avons effectué une nouvelle et indépendante détermination d'une quantité cruciale en cosmologie : le taux d'expansion actuel de l'Univers. Cette mesure effectuée grâce aux ondes gravitationnelles marque l'aube d'une nouvelle ère passionnante de la cosmologie.



*Figure 1 : Vue d'artiste de la fusion de deux étoiles à neutrons. Les faisceaux étroits représentent l'émission prompt de rayons gamma tandis que l'ondulation de la grille spatio-temporelle indique les ondes gravitationnelles caractéristiques de la fusion, émises dans toutes les directions de l'espace. Les tourbillons de matière éjectée des étoiles qui fusionnent sont peut-être la source de la lumière vue à plus basses énergies. Crédit : National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.*

### UNE BREVE HISTOIRE DE L'EXPANSION DE HUBBLE

Il y a près de 90 ans, les astronomes apprenaient que notre univers est en expansion. Cette découverte fondamentale a révolutionné notre compréhension du cosmos, et constitue le fondement de la théorie du Big Bang, de la naissance de l'univers et de son évolution. Elle constitue une des pierres angulaires de la cosmologie moderne. À l'avant-garde de cette découverte se trouvait Edwin Hubble, dont le télescope spatial porte le nom ; ses observations de galaxies dans

l'univers voisin ont révélé une relation linéaire entre leur distance et leur vitesse radiale (voir Figure 2) - compatible avec l'interprétation selon laquelle les galaxies ne se déplacent pas dans leur ensemble à travers l'espace, mais sont portées par l'expansion de l'espace lui-même. Ce phénomène d'expansion universelle porte maintenant le nom d'expansion de Hubble, et le taux actuel d'expansion - égal à la constante de proportionnalité dans la relation linéaire de Hubble - est connu sous le nom de constante de Hubble, désignée par le symbole  $H_0$  et exprimée en kilomètres par seconde et par mégaparsec (noté Mpc : un parsec est une unité de distance égale à environ 3,26 années-lumière ou  $3,086 \times 10^{16}$  mètres).

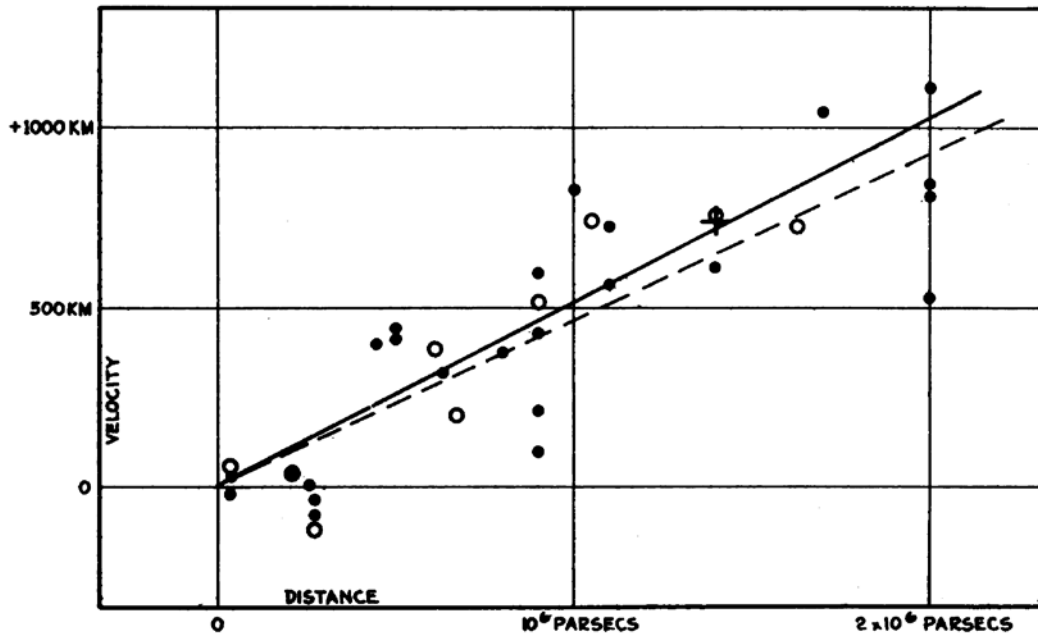


Figure 2 : Diagramme montrant la relation de Hubble, adapté des données originales de 1929 d'Edwin Hubble. La relation linéaire entre vitesse radiale (axe vertical, incorrectement étiquetée en kilomètres dans la présentation originale de Hubble) et distance (axe horizontal, étiqueté en parsecs) est clairement apparente - bien qu'il y ait beaucoup de dispersion dans les données et que la gamme de distance ne s'étende qu'à 2 Mpc environ. Les différents points et cercles représentent les mesures de vitesse de différentes galaxies. La figure montre qu'elles ont tendance à être alignées sur une droite et que donc leur vitesse est liée à leur distance par une relation linéaire. Crédit : Proc. Nat. Acad. Les sciences. (1929).

Les méthodes actuelles pour estimer la constante de Hubble peuvent être groupées en deux approches. La première est essentiellement une reprise de la méthode initialement employée par Hubble et ses collègues ; elle consiste à mesurer les distances et les vitesses radiales des galaxies dans le (relativement) proche Univers, maintenant étendu à des distances beaucoup plus grandes que celles que sondait Hubble. La clé de cette extension a été de relier entre elles, grâce au télescope spatial Hubble, les observations des étoiles variables céphéides - l'une des mieux comprises et plus fiables méthodes de mesure de distances des galaxies jusqu'à quelques dizaines de Mpc - avec d'autres indicateurs de distance, tels que les supernovæ de type 1a, pouvant être utilisés au-delà de la centaine de Mpc. Cette combinaison d'indicateurs de distances est souvent appelée Echelle de Distance Cosmique, et une amélioration cruciale apportée par le télescope spatial Hubble a été de réduire le nombre de « barreaux » sur cette échelle - mais pas de les éliminer complètement.

Une deuxième méthode pour estimer la constante de Hubble consiste à étudier les données cosmologiques sur des échelles beaucoup plus grandes - par exemple à partir du rayonnement de fond cosmologique (CMB) qui est une relique des processus physiques qui ont eu lieu peu de temps



LIGO  
Scientific  
Collaboration



après le Big Bang quand l'Univers est devenu assez froid pour permettre aux protons et aux électrons de se combiner en atomes neutres. La densité de l'Univers à cette époque n'était pas complètement uniforme, et nous observons de minuscules variations de la température du CMB dans différentes directions. La modélisation de ces variations de température apporte des informations précises sur les ingrédients de l'Univers primordial, et la façon dont ces ingrédients ont évolué pendant près de 13,7 milliards d'années jusqu'à aujourd'hui. Le modèle est également très sensible aux paramètres globaux qui pilotent l'expansion universelle, y compris son taux d'expansion actuel ; on peut donc déduire la valeur de  $H_0$  de la mesure du CMB.

Les valeurs de la constante de Hubble obtenues en utilisant ces deux méthodes "électromagnétiques", appliquées à des distances cosmologiques proches et très éloignées, sont actuellement incompatibles l'une avec l'autre - en ce sens que les valeurs mesurées, en tenant compte des incertitudes, ne se chevauchent pas. L'échelle proche, par exemple les résultats du projet ShoES combinant céphéides et supernovae de type 1a, donne une constante de Hubble d'environ 8 % plus grande que la valeur obtenue à partir d'échelles très éloignées, en utilisant par exemple les observations très précises du satellite Planck de l'Agence Spatiale Européenne. Bien que cette différence ne semble pas trop grande, et soit même inférieure aux énormes incohérences entre différentes estimations de la constante de Hubble qui ont sévi au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, il représente néanmoins un casse-tête important et non résolu pour les scientifiques.

#### UNE NOUVELLE APPROCHE : LES SIRÈNES STANDARD

Nous présentons ici une nouvelle approche pour mesurer la constante de Hubble. Elle utilise les ondes gravitationnelles - appliquant pour la toute première fois une méthode révolutionnaire proposée il y a plus de 30 ans dans un article fondateur de Bernard Schutz. L'idée de cette méthode était d'estimer la distance d'une galaxie en utilisant les observations en ondes gravitationnelles à la façon dite d'une « sirène standard », qui est l'analogue gravitationnel d'une "bougie standard" en astronomie - la luminosité (et donc la distance) pouvant être déduite directement des observations. Les sirènes standards sont les systèmes binaires compacts, constitués d'étoiles à neutrons ou de trous noirs, dont l'onde gravitationnelle en forme de « chirp », émise quand les deux objets compacts spiralent vers leur fusion, porte l'information sur la distance de la source - ainsi que les masses d'objets compacts et autres paramètres du système. L'analyse de la forme de l'onde permet donc d'estimer cette distance. Nous avons utilisé la source d'ondes gravitationnelles GW170817, qui a été détectée par Advanced LIGO et Advanced Virgo le 17 août 2017, pour réaliser la toute première mesure de la constante de Hubble par cette méthode de la sirène standard.

GW170817 est le tout premier événement gravitationnel observé aussi en ondes électromagnétiques. Cette observation conjointe a confirmé l'hypothèse de la fusion d'une binaire d'étoiles à neutrons et permis l'identification de la galaxie hôte - une galaxie elliptique appelée NGC 4993 dans la constellation de l'Hydre. L'analyse de la forme de l'onde de GW170817 donne une estimation de la distance de cette galaxie d'environ 44 Mpc, en supposant que la position de GW170817 coïncide exactement avec NGC 4993. Cette estimation de distance comporte une incertitude d'environ 15 %, due à la fois au bruit instrumental dans les détecteurs et au fait que nous ne connaissons pas précisément l'inclinaison du plan orbital du système binaire des étoiles à neutrons par rapport à la Terre. (Voir aussi la figure 4). Néanmoins, notre estimation de la distance gravitationnelle a la grande vertu d'être complètement indépendante de l'Echelle de Distance Cosmique dérivée de l'observation électromagnétique.

#### UNE MESURE DE $H_0$ PAR SIRÈNE STANDARD

Pour estimer  $H_0$ , nous devons combiner la distance séparant la Terre de NGC 4993 obtenue en ondes gravitationnelles, avec la vitesse radiale de cette galaxie due à l'expansion de Hubble. Cependant nous ne pouvons pas simplement utiliser la vitesse radiale mesurée de NGC 4993, car cette vitesse

n'est pas due qu'à l'expansion de l'Univers. L'Univers est grumeleux, et les galaxies ont des mouvements particuliers (appelés mouvements propres) en raison de l'attraction d'autres galaxies et amas de galaxies (et aussi de la matière noire, invisible) dans leur voisinage. NGC 4993 n'étant pas très éloignée, sa vitesse propre constitue probablement une part appréciable de sa vitesse radiale mesurée, et ne peut donc pas être ignorée.

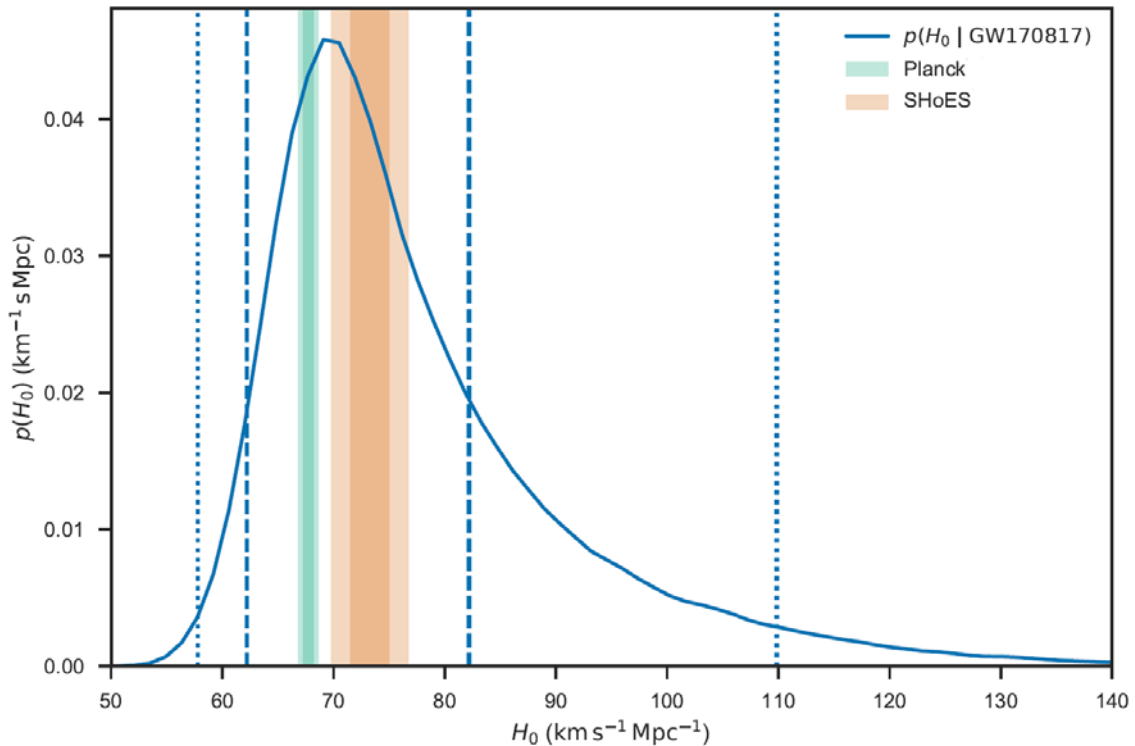


Figure 3 : Tracé résumant nos déductions sur la constante de Hubble. La probabilité relative des différentes valeurs possibles pour  $H_0$  est représentée par la courbe bleue en trait plein, qui culmine à  $70 \text{ km}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Les lignes verticales bleues tiretées et pointillées montrent respectivement les limites de 68,3 % et 95,4 % des intervalles de confiance pour  $H_0$ . Les bandes verticales vertes et orange représentent les contraintes sur  $H_0$  des deux analyses utilisant uniquement des données électromagnétiques : les bandes vertes montrent la gamme des valeurs déduites de l'analyse des données du CMB obtenues par le satellite Planck ; les bandes orange montrent la gamme de valeurs déduite de l'analyse SHoES qui combine céphéides et données de supernovae de type 1a de l'Univers relativement proche. La couleur plus foncée et plus claire des bandes indique respectivement 68,3% et 95,4% d'intervalles de confiance. Notez que les résultats de Planck et SHoES sont en désaccord les uns avec les autres avec un niveau de probabilité de 95,4 %. Notre résultat gravitationnel est cependant compatible à la fois avec les valeurs de Planck et de SHoES.

Pour tenir compte de la vitesse propre de NGC 4993 nous avons d'abord identifié le petit groupe de galaxies auquel elle est associée, puis utilisé les résultats d'une étude plus large des vitesses propres des galaxies pour corriger le mouvement d'ensemble de ce groupe. Ceci a donné une estimation de "vitesse de Hubble" pour NGC 4993 (c'est-à-dire la vitesse qu'elle aurait si elle était simplement entraînée par l'expansion de Hubble) d'un peu plus de  $3000 \text{ km s}^{-1}$ . Nous avons vérifié ce résultat en le comparant avec d'autres méthodes utilisées pour reconstruire les vitesses propres des galaxies sur de grandes échelles, et trouvé que nos résultats étaient totalement cohérents les uns avec les autres. Par précaution, nous avons considéré une grande incertitude, de  $150 \text{ km s}^{-1}$ , pour la vitesse propre,

mais malgré cela l'essentiel de l'incertitude sur notre estimation de  $H_0$  vient de celle affectant la distance mesurée en ondes gravitationnelles qui est de l'ordre de 15 %.

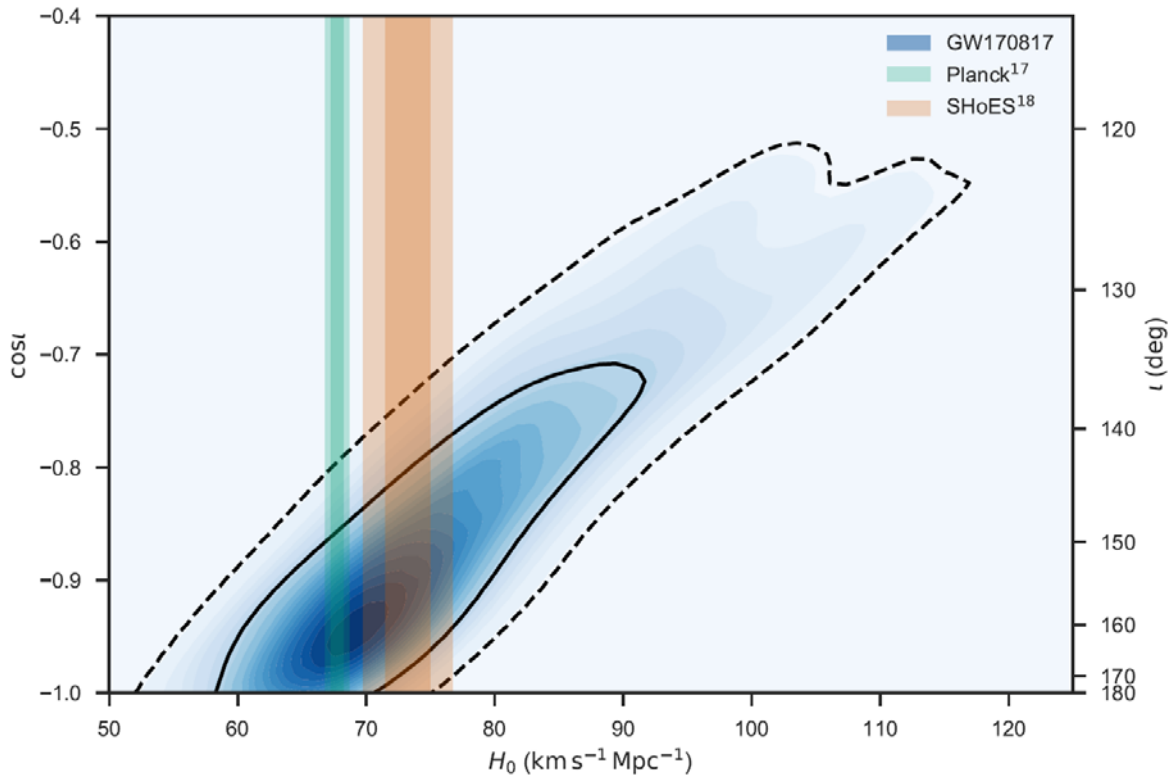


Figure 4 : Diagramme montrant la valeur de la constante de Hubble déduite de nos observations (axe horizontal) en fonction de l'inclinaison du plan orbital du système des deux étoiles à neutrons (axe vertical, l'axe de droite montre angle d'inclinaison en degrés et l'axe de gauche montre le cosinus de l'angle d'inclinaison). La partie la plus sombre montre la région de probabilité la plus élevée. Notez la corrélation entre l'angle d'inclinaison et la constante de Hubble inférée. C'est que l'amplitude d'une onde gravitationnelle émise par une binaire de neutrons distante vue de face ou de l'arrière est similaire à celle d'une binaire plus proche vue de côté. La région de plus forte probabilité correspond à des angles d'inclinaison proches de 180 degrés - indiquant que GW170817 a été vue presque de face.

La figure 3 illustre le résultat de l'analyse de notre mesure de la constante de Hubble. La courbe bleue en trait plein représente la probabilité de différentes valeurs de  $H_0$  ; le pic de la distribution est à  $70 \text{ km}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Les lignes tiretée et pointillée marquent les limites des intervalles de vraisemblance en tenant compte des marges d'incertitudes pour  $H_0$ , c'est-à-dire les intervalles dans lesquels notre analyse indique que la constante de Hubble réside avec une certaine probabilité.

Notre mesure est cohérente avec les valeurs de  $H_0$  trouvées en utilisant à la fois des données cosmologiques proches et très éloignées, représentées par les analyses de SHoES et de Planck respectivement, mais surtout, cette nouvelle valeur est complètement indépendante de l'Echelle de Distance Cosmique traditionnelle. Cela marque une étape importante dans la longue histoire de la mesure du taux d'expansion de l'Univers, et nous anticipons qu'à l'avenir les observations en ondes gravitationnelles seront capables de faire des mesures de plus en plus précises de cette quantité fondamentale. L'ère de la cosmologie en ondes gravitationnelles est vraiment arrivée !

**Pour plus d'informations**

- Voir [http://public.virgo-gw.eu/gw170817\\_fr](http://public.virgo-gw.eu/gw170817_fr)



Visiter nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

