

Pouvez-vous nous rappeler brièvement l'origine de cette crise ?

Depuis sa naissance, l'Univers est en expansion, mais à une vitesse qui a varié au cours du temps. La constante de Hubble, notée H_0 , indique le taux d'expansion actuel. L'astronome américain Edwin Hubble, à la fin des années 1920, a été le premier à estimer la constante qui porte son nom. Son résultat était très approximatif, mais aujourd'hui, grâce à l'amélioration des techniques, des méthodes reposant sur des principes différents donnent des valeurs dans un intervalle très resserré. Cela prouve que nous comprenons globalement bien comment l'Univers fonctionne. Cependant, même si ces valeurs sont proches, certaines sont incompatibles entre elles (voir l'article de Richard Panek dans ce numéro). En l'état, nous ne pouvons ni expliquer ni ignorer ces différences.

Quel est l'enjeu ?

Les deux méthodes les plus connues pour mesurer H_0 utilisent des approches diamétralement opposées. La première construit échelon après échelon une échelle de distance en partant de l'univers local et en établissant une relation vitesse-distance liée au taux d'expansion. L'autre méthode utilise le fond diffus cosmologique, le rayonnement émis par l'Univers quand il avait 380 000 ans. L'idée est de partir d'une référence de longueur dans l'Univers jeune et de suivre son évolution en revenant vers le présent. Pour cela, il faut se donner un modèle cosmologique qui fournit les ingrédients pour décrire l'histoire de l'Univers. Les cosmologistes sont alors à même de calculer H_0 . Si le modèle est correct et si la construction de l'échelle des distances a été bien faite, les deux méthodes devraient converger vers la même valeur de H_0 ... et ce n'est pas le cas ! Où est l'erreur ? Dans les mesures, les analyses ou dans le modèle cosmologique ? C'est ce que nous devons déterminer.

Quelles pourraient être les sources d'erreur dans, par exemple, l'analyse du fond diffus cosmologique ?

L'Univers primordial était rempli d'un plasma chaud (des protons et des électrons libres liés aux photons), parcouru d'ondes, dites « acoustiques », qui ont créé des zones de surdensité de matière. Ces ondes se propageaient à une vitesse caractéristique qui fournit une référence de longueur correspondant à peu près à la distance que les ondes ont parcourue depuis le Big Bang en 380 000 ans. À ce moment, le plasma est devenu assez froid pour que les protons et les électrons s'associent et forment des atomes neutres. Les photons se sont alors échappés, ce qui a donné le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement isotrope et

quasi homogène correspond à une température de 2,7 kelvins. Mais les surdensités de matière ont provoqué de petites fluctuations de température, mesurées avec précision par le satellite *Planck*. À partir des caractéristiques statistiques de ces fluctuations, les cosmologistes déduisent des informations sur les conditions ayant régné dans l'Univers primordial. Ensuite, avec le modèle cosmologique standard, ils extrapolent l'histoire de l'expansion cosmique et calculent la constante de Hubble, à l'époque actuelle. La collaboration *Planck* a ainsi obtenu $H_0 = 67,4$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Les mesures de *Planck* sont très fiables. C'est plutôt dans l'interprétation des données qu'un problème pourrait se nicher. D'abord, il y a le modèle cosmologique qui est éventuellement à reconsidérer. Celui-ci intègre des éléments comme l'énergie sombre, qui explique que l'expansion cosmique accélère mais dont la nature n'est pas connue. Et cette dernière influe sur la valeur calculée de H_0 .

Autre piste, la vitesse du son dans le plasma primordial est peut-être mal évaluée. Pour la déterminer, la collaboration *Planck* a fait quelques hypothèses simplificatrices qui étaient alors raisonnables : absence de turbulences et de champ magnétique dans le plasma. Mais si ces hypothèses sont incorrectes, la vitesse du son change, la référence de distance aussi et, par ricochet, H_0 serait à réévaluer. On a intérêt aujourd'hui à travailler avec des spécialistes des plasmas pour étudier des conditions plus réalistes de l'Univers primordial.

Et comment fonctionne la méthode de l'échelle des distances ?

L'idée est de construire la relation, pour différents objets dans l'Univers, entre leur distance et leur vitesse de récession (c'est-à-dire leur vitesse d'éloignement due à l'expansion cosmique). En établissant cette relation sur une longue plage de distances, on peut extrapoler jusqu'à aujourd'hui et estimer finement H_0 .

Il est assez simple de mesurer la vitesse d'un objet grâce au *redshift*, c'est-à-dire le décalage du spectre vers les grandes longueurs pour un objet s'éloignant de nous à cause de l'expansion de l'Univers. Plus un objet s'éloigne vite et plus le *redshift*, ou décalage vers le rouge, est important.

Mais mesurer la distance est autrement plus difficile. Il faut utiliser des références qu'on établit de proche en proche. On commence par la parallaxe, une méthode géométrique : si l'on observe une étoile au cours de l'année, elle semble changer de position du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil ; par un calcul de trigonométrie, on estime alors la distance de l'étoile. Cela fonctionne pour des étoiles assez proches, car plus elles sont lointaines, plus le changement de position est petit et difficile à mesurer.

> Cette approche sert alors à calibrer les céphéides. En 1912, l'astronome américaine Henrietta Swan Leavitt a découvert que la périodicité de ces étoiles variables était reliée à leur luminosité intrinsèque. On peut déterminer la distance des céphéides proches par la méthode de la parallaxe et ainsi déduire de leur luminosité apparente (celle qu'on mesure) leur luminosité intrinsèque; cela permet de calibrer la relation périodicité-luminosité intrinsèque. On utilise ensuite cette relation pour déterminer la luminosité intrinsèque des céphéides plus lointaines, ce qui, en comparant à leur luminosité apparente, fournit leur distance. Pour cette raison, les céphéides sont qualifiées de « chandelles standard ».

Ces étoiles atteignent une luminosité 100 000 fois supérieure à celle du Soleil et sont alors visibles jusqu'à environ 130 millions d'années-lumière. Pour aller au-delà, on utilise les céphéides pour calibrer les supernovæ de type Ia, des explosions d'étoiles très lumineuses (10 milliards de fois la luminosité du Soleil) dont on connaît aussi une relation qui donne accès à leur luminosité intrinsèque. Par cette méthode, on reconstruit l'échelle des distances dans l'Univers.

Au sein du projet *SHoES*, Adam Riess, de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé cette technique et obtiennent $H_0 = 73$ kilomètres par seconde et par mégaparsec. Mais si l'on prend en compte les incertitudes, cette valeur est incompatible avec celle obtenue par la collaboration *Planck*.

À quel point le calibrage est-il maîtrisé dans cette approche ?

Le calibrage est vraiment crucial. Une incertitude dans les mesures de parallaxe se propagerait sur toute l'échelle des distances et introduirait des erreurs systématiques dans le calcul de H_0 . Actuellement, le satellite *Gaia* mesure la parallaxe avec une extrême précision pour des millions d'étoiles (dont des céphéides) dans la Voie lactée et les nuages de Magellan. Ce catalogue de mesures sera utilisé pour améliorer les résultats.

Beaucoup de distances sont aussi calibrées avec des objets situés dans le Grand Nuage de Magellan. Les incertitudes quant à la distance de cette galaxie naine proche de la Voie lactée ont été réduites en 2019 en utilisant une méthode originale reposant sur des systèmes binaires d'étoiles.

Une autre méthode permet de mesurer précisément la distance de galaxies. Elle repose sur un phénomène d'émission laser microonde (ou maser). Cette technique a été utilisée pour la galaxie NGC 4258, située à 23,5 millions d'années-lumière. Ces émissions sont cependant très rares. Elles sont dues à des molécules d'eau de nuages moléculaires dans des environnements très énergétiques comme des noyaux ac-

MAÎTRISER LES INCERTITUDES DE MESURE

Pour déterminer la valeur d'une grandeur physique, on effectue en général plusieurs mesures. La moyenne des résultats obtenus donne une estimation de cette grandeur. Cependant, il faut tenir compte des incertitudes qui sont de deux types : les erreurs statistiques et les erreurs systématiques.

Les premières sont liées au nombre de mesures réalisées. Par exemple, si l'on effectue un sondage auprès

d'une personne, il y a peu de chance que sa réponse soit représentative de celle de la population entière. Il faut donc augmenter le nombre de personnes sondées pour réduire les erreurs statistiques. Cela se traduit par une diminution des barres d'erreur.

L'erreur systématique est plus subtile. Elle est par exemple liée à un défaut dans le protocole de mesure (si un instrument est mal étalonné par exemple) qui induit un biais sur chacune des mesures. Cela se répercute sur la valeur moyenne, et elle ne diminue pas en effectuant davantage de mesures. Cette erreur peut parfois être estimée, mais pas toujours, notamment si certaines sources d'erreurs n'ont pas été prises en compte (parce que le modèle n'est pas le bon, parce qu'il fait des hypothèses trop simplificatrices, etc.).

Dans le cas de la constante de Hubble, les chercheurs passent beaucoup de temps à analyser leurs sources d'incertitudes. Des erreurs systématiques pourraient ainsi expliquer la crise actuelle.

SEAN BAILLY
Pour la Science

tifs de galaxies. Par ailleurs, en utilisant directement ces masers dans quatre galaxies, des chercheurs ont estimé H_0 à 74,8 kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Quelles sont les autres méthodes de mesure de H_0 ?

D'autres types d'étoiles ont été proposés comme chandelles standard et jouent un rôle similaire aux céphéides. Par exemple, l'équipe de Wendy Freedman, de l'université de Chicago, étudie une sous-population particulière des étoiles géantes rouges. Elle obtient une estimation de H_0 assez basse pour une technique qui construit l'échelle des distances cosmiques : 69,6 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Cette valeur se trouve à mi-chemin entre celles de *Planck* et de *SHoES*.

Une autre piste utilise les étoiles de type Mira, des géantes rouges variables. L'avantage de ces astres sur les céphéides est qu'ils sont beaucoup plus nombreux. On peut donc espérer avoir de meilleures analyses statistiques. Les premiers résultats donnent $H_0 = 73,3$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Il existe encore d'autres façons de construire l'échelle des distances. On constate qu'à l'exception des géantes rouges de Wendy Freedman, elles convergent toutes (parfois avec des barres d'erreur encore assez grandes) vers une valeur compatible avec celle de *SHoES*.

Quelle est la fiabilité des chandelles standard ?

C'est une question difficile. Les relations qui donnent la luminosité intrinsèque sont-elles réellement universelles ? Une céphéide brille-t-elle de la même façon dans toutes les galaxies ? En effet, les galaxies n'ont pas toutes la même métallicité (le contenu en éléments plus lourds que l'hydrogène, l'hélium et le lithium). La composition des étoiles y est donc différente, ce qui peut influencer leur comportement. Même question pour les supernovæ : explosaient-elles de la même façon dans l'Univers plus jeune ?

Valider ces hypothèses est un défi majeur. Plus on regarde loin dans l'Univers et plus il est difficile de détecter des supernovæ. Il faut regarder dans la bonne direction, au bon moment. Les futurs grands instruments comme le télescope spatial *James-Webb*, l'*E-ELT* (le futur observatoire géant que l'Europe construit au Chili) ou l'observatoire *Vera-Rubin* (nouveau nom du *LSST*) amélioreront la situation, mais ne permettront probablement pas de confirmer l'universalité des chandelles standard.

Existe-t-il d'autres méthodes qui soient indépendantes de ces chandelles standard ?

Une toute nouvelle méthode consiste à utiliser les ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, ondes que la collaboration *Ligo-Virgo* a détectées pour la première fois en 2017. On parle de « sirènes standard » ! L'amplitude des ondes gravitationnelles captées permet de déterminer la distance de l'événement. Et contrairement à la coalescence de deux trous noirs, l'événement s'accompagne d'une émission intense d'ondes électromagnétiques dont on déduit, grâce au *redshift*, la vitesse de récession de la paire d'étoiles. Avec seulement six fusions de ce type détectées pour l'instant, la collaboration *Ligo-Virgo* a obtenu pour H_0 une estimation de 68 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Mais les barres d'erreur sont encore très grandes. Les spécialistes de cette méthode estiment qu'il faudrait une cinquantaine d'événements pour avoir une valeur compétitive.

Cette technique est encore assez jeune. Il se pose beaucoup de questions sur sa robustesse. Par exemple, il faut déterminer avec précision la masse des étoiles qui ont fusionné pour connaître l'amplitude initiale, ce qui est loin d'être évident et dépend des modèles. Autre difficulté, les ondes gravitationnelles peuvent être amplifiées sur leur chemin, par un effet de lentille gravitationnelle ; la coalescence peut alors paraître plus proche qu'elle ne l'est en réalité.

Et vous, sur quelle méthode travaillez-vous ?

Dans notre projet *HoLiCOW*, l'idée est d'utiliser ce phénomène bien connu en

relativité générale qu'est la lentille gravitationnelle. Prenez un objet lointain comme un quasar (une galaxie au noyau très actif et émettant beaucoup de lumière) et imaginez qu'une galaxie très massive se trouve sur la ligne de visée. Celle-ci agit comme une lentille dans un dispositif optique. En déformant l'espace-temps dans son voisinage, la galaxie-lentille dévie la lumière du quasar qui passe près d'elle et la focalise vers nous. La lumière nous parvient en suivant différents chemins de longueurs différentes, ce qui se manifeste par des images multiples du quasar. Quand la lumière du quasar fluctue, celle de ses images aussi, mais en décalé dans le temps (de plusieurs mois ou plus), car les chemins parcourus par la lumière ne sont pas de même longueur. En 1964, Sjur Refsdal a montré qu'il est possible d'exprimer la constante de Hubble en fonction de ce délai temporel et du *redshift*.

L'analyse est complexe, car divers phénomènes perturbent la mesure du délai temporel. Il faut aussi modéliser de la façon la plus réaliste possible la distribution de masse de la galaxie-lentille pour reproduire correctement le champ gravitationnel de la lentille qui, par dilatation du temps, influe sur le délai. Enfin, il faut aussi tenir compte de la matière présente sur le parcours de la lumière.

Qui plus est, de telles configurations de lentilles pour un quasar sont rares. Nous en avons étudié sept avec précision. Nous avons obtenu des valeurs de la constante de Hubble toutes très voisines, ce qui nous donne confiance en notre méthode d'analyse. Notre estimation est d'environ 73,3 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Ce résultat est très proche de celui de *SHoES*. Avec les instruments d'observation à venir, nous espérons exploiter 50 quasars d'ici à quelques années. C'est l'objectif du nouveau consortium international *TDCOSMO* (*Time delay cosmography*).

Peut-on espérer que la crise cosmologique sera bientôt résolue ?

Aujourd'hui, la diversité de méthodes indépendantes de mesure de H_0 , avec des erreurs systématiques de natures différentes, enrichit le débat. Nous ne savons pas encore expliquer tous les écarts dans les mesures, mais, en comparant méticuleusement ces approches, nous devrions bientôt commencer à y voir plus clair.

Si le désaccord persiste, il faudra probablement repenser les modèles. Différentes pistes existent – les conditions dans le plasma primordial, la nature de l'énergie sombre, et bien d'autres. Nous avons même trop de solutions : pour l'instant, nous avons une serrure, mais toutes les clés fonctionnent. Nous ne savons pas encore laquelle est la bonne !

Propos recueillis
par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

K. C. Wong et al., **HoLiCOW XIII. A 2.4 % measurement of H_0 from lensed quasars : 5.3 σ tension between early and late-Universe probes**, à paraître dans *MNRAS*, 2020. (prépublication sur arXiv).

A. G. Riess et al., **Large Magellanic Cloud cepheid standards provide a 1 % foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM**, *Astrophys. J.*, vol. 876(1), article 85, 2019.

W. L. Freedman et al., **The Carnegie-Chicago Hubble program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch**, *Astrophys. J.*, vol. 882(1), article 34, 2019.