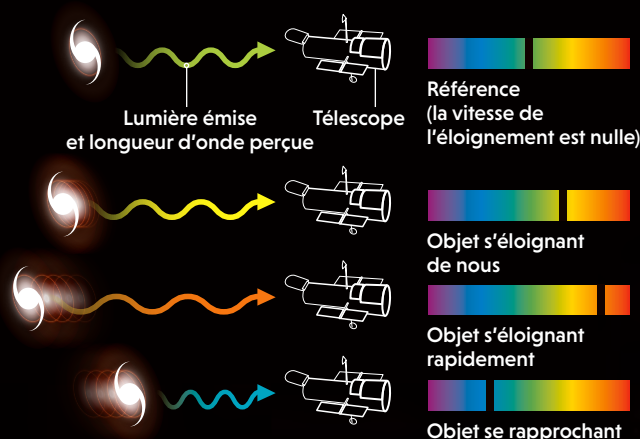


UN CONFLIT AU CŒUR DE LA COSMOLOGIE

La constante de Hubble (H_0) indique le taux d'expansion actuel de l'Univers. Sa valeur est cruciale pour la cosmologie mais elle fait l'objet d'une grave controverse. Contrairement à ce qu'on espérait, les diverses méthodes d'estimation de H_0 sont en désaccord. L'écart entre les mesures s'expliquerait soit par des erreurs dans une des approches, soit par un problème plus fondamental dans notre compréhension actuelle de l'Univers.



MESURER LA VITESSE DES GALAXIES

La méthode classique pour mesurer H_0 consiste à déterminer à la fois la vitesse d'éloignement et la distance de galaxies lointaines. On obtient la vitesse grâce au phénomène de décalage vers le rouge cosmologique : du fait de l'expansion de l'Univers, le spectre de la lumière d'un objet qui s'éloigne de nous se décale vers les grandes longueurs d'onde. Plus le décalage est grand, plus la vitesse d'éloignement est élevée.

Big Bang

OBSERVATION DE L'UNIVERS PRIMORDIAL

La constante de Hubble peut être mesurée en utilisant le fond diffus cosmologique (CMB), le rayonnement fossile du Big Bang émis quand l'Univers avait à peine 379 000 ans et ne contenait jusque-là qu'un plasma dense et chaud. Des ondes, dites « acoustiques », se propageant dans le plasma ont formé des zones de surdensité ou de sous-densité de matière qui ont marqué le fond diffus de leur empreinte en y créant de petites fluctuations de température. En analysant les propriétés de ces fluctuations, les cosmologistes en font une référence pour suivre la croissance de l'Univers au cours de son histoire. De cette étude, on détermine la constante de Hubble.

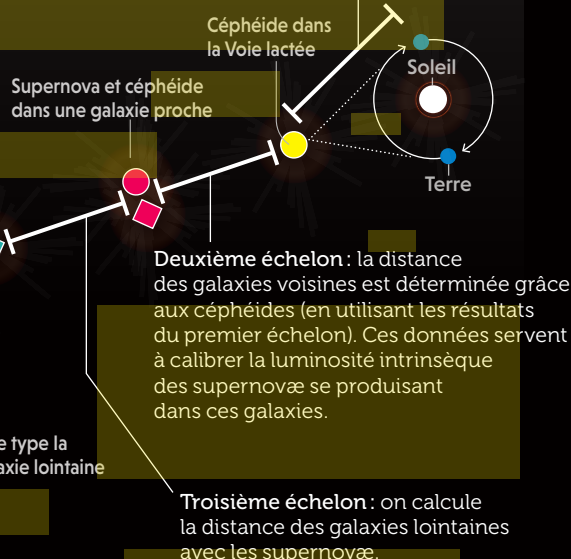
Fond diffus cosmologique

Aujourd'hui

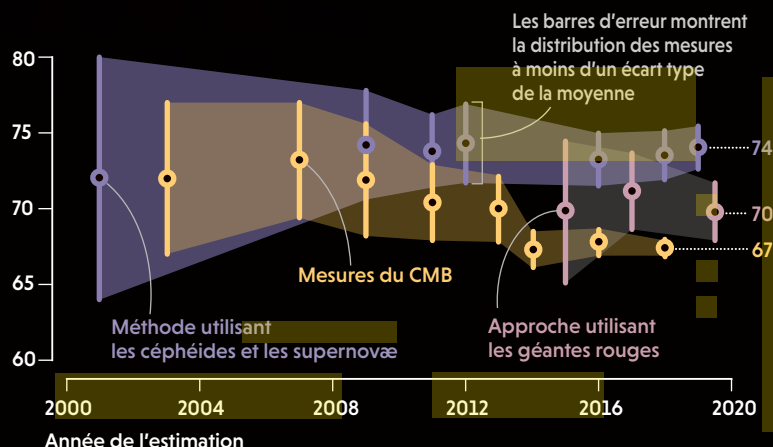
ESCALADER L'ÉCHELLE DES DISTANCES

Déterminer les distances dans l'Univers est bien plus difficile que d'estimer les vitesses. La stratégie des astronomes consiste à utiliser diverses techniques qui sondent différentes plages de distances se recouvrant, l'une servant à étalonner la suivante. Les céphéides (des étoiles variables dont on connaît la luminosité intrinsèque) constituent le premier barreau de l'échelle. On les utilise pour calculer la distance des galaxies voisines. Les galaxies plus lointaines nécessitent d'utiliser des objets plus lumineux, dont on peut aussi connaître la luminosité intrinsèque, en l'occurrence certaines explosions d'étoiles, les supernovæ de type Ia.

Premier échelon : on calcule la distance des céphéides (dans la Voie lactée) en utilisant la méthode de la parallaxe, une technique de triangulation. Avec la luminosité apparente et la distance, on détermine la luminosité intrinsèque de ces étoiles.



Estimation de la constante de Hubble (en kilomètres par seconde et par mégaparsec)

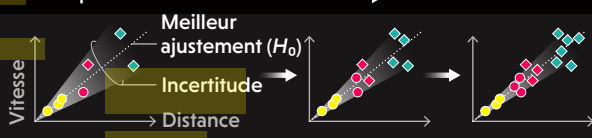


UN DÉSACCORD QUI SE CREUSE

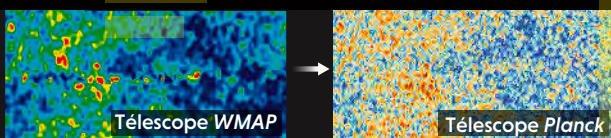
La mesure fondée sur le CMB donne $H_0 = 67$ (en kilomètres par seconde et par mégaparsec, 1 mégaparsec vaut 3,26 millions d'années-lumière). Le résultat calculé avec les céphéides est $H_0 = 74$. Une nouvelle méthode utilisant des étoiles géantes rouges dont les éruptions ont une luminosité intrinsèque connue indique une valeur $H_0 = 70$, juste entre les deux précédentes. Et sans recouvrement des barres d'erreur.

La précision augmente avec le temps

Méthode de l'échelle des distances : augmentation du nombre de mesures d'étoiles individuelles



Méthode du CMB : instruments plus précis



VERS UNE RÉCONCILIATION... OU DE LA NOUVELLE PHYSIQUE

Les chercheurs améliorent en permanence la précision de leur estimation de la constante de Hubble. Ils réduisent leurs incertitudes dans l'espoir de voir les résultats converger. Des télescopes plus grands observent des céphéides plus lointaines dans l'Univers, le satellite *Planck* a considérablement amélioré les données sur le CMB. Mais si les résultats restent inconciliables, les modèles cosmologiques seront à revoir.

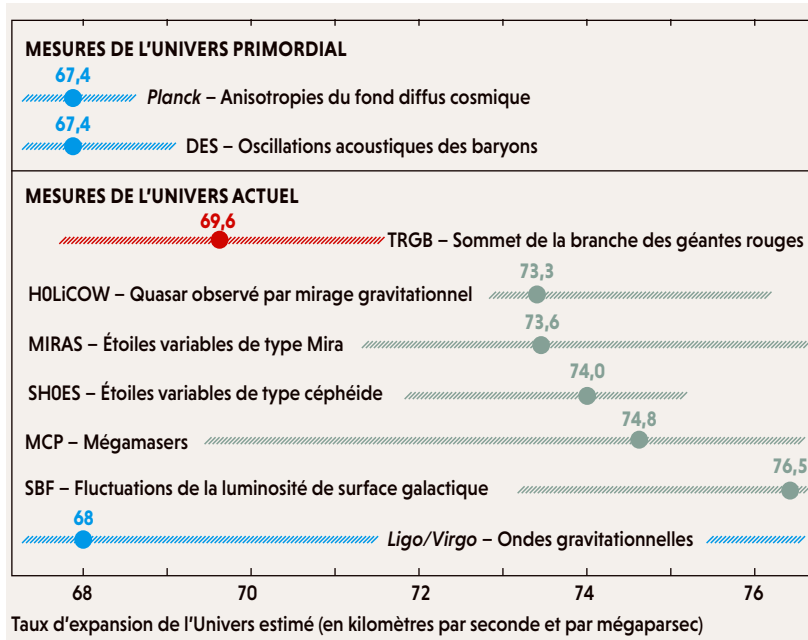
> standard étaient des étoiles céphéides variables, des astres dont la brillance augmente et diminue avec une période qui est reliée à leur luminosité absolue. En trouvant une valeur intermédiaire de 72 ± 8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, cette équipe a tranché en plein milieu du débat et a mis tout le monde d'accord.

Il restait à obtenir une mesure plus précise. Adam Riess, qui a partagé en 2011 le prix Nobel de physique pour son rôle dans la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers en 1998, a lancé un nouveau projet purement astronomique, SH0ES (*Supernovae, H_0 , for the equation of state of dark energy*). Cette équipe a utilisé à la fois les céphéides et les supernovae de type Ia (dont certaines des plus distantes jamais observées) comme chandelles standard. En 2005, l'équipe a obtenu un résultat préliminaire de 73 ± 4 , un résultat très proche de celui obtenu par l'équipe de 2001, mais avec des barres d'erreur réduites. Depuis, la collaboration SH0ES a publié plusieurs mises à jour, en améliorant les incertitudes. La plus récente, en 2019, fait état d'une constante de Hubble de $74,03 \pm 1,42$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Dans la méthode suivie par Adam Riess et d'autres, on commence par des mesures sur des objets proches et on utilise ces données pour calibrer des chandelles standard de plus en plus lointaines. Depuis une vingtaine d'années, des chercheurs utilisent aussi l'approche inverse. Ils partent de l'Univers très jeune et remontent jusqu'à aujourd'hui. Leur point de départ n'est autre que le fond diffus cosmologique observé pour la première fois par Wilson et Penzias en 1965.

Le fond diffus est un rayonnement émis dans l'Univers alors qu'il n'était âgé que de 379 000 ans. À cette époque, le plasma de protons et d'électrons libres qui emplissait le cosmos est devenu assez froid pour que des atomes neutres d'hydrogène s'y forment. Le plasma est alors devenu transparent, ce qui a permis aux photons de voyager à travers l'Univers et de parvenir jusqu'à nous, 13,8 milliards d'années plus tard. Alors que Wilson et Penzias avaient observé un rayonnement homogène en température dans toutes les directions du ciel, les théoriciens ont prédit qu'avec des instruments plus sensibles, les chercheurs détecteraient des fluctuations de température. Celles-ci correspondent à des surdensités dans le plasma primordial, qui ont donné naissance aux structures de l'Univers: les galaxies, les amas de galaxies et les superamas de galaxies.

En 1992, la première sonde spatiale dédiée à la recherche du fond diffus cosmologique, *Cobe* (Cosmic background explorer), a détecté ces fluctuations de température pour la première fois. Puis, en 2003, la sonde WMAP



Les chercheurs font appel à diverses méthodes pour estimer la vitesse actuelle d'expansion de l'Univers. Les cosmologistes utilisent le fond diffus cosmologique ou les oscillations acoustiques des baryons (en bleu); les astronomes se servent de chandelles standard, des indicateurs de distances. D'autres techniques indépendantes s'appuient sur des quasars ou sur les ondes gravitationnelles.

(Wilkinson microwave anisotropy probe) a amélioré la résolution. Les chercheurs ont alors pu analyser les propriétés statistiques de ces fluctuations et déterminer les conditions régnant dans le plasma primordial. En particulier, ils ont identifié la taille des ondes acoustiques qui s'y propageaient et qui ont provoqué les zones de surdensité. En connaissant la «vitesse du son», les cosmologistes ont défini une échelle de référence grâce aux «taches» dans le fond diffus. Cette échelle de référence a ensuite été utilisée pour mesurer l'expansion et la croissance des grandes structures jusqu'à aujourd'hui. Et ces mesures donnent le taux d'expansion de l'Univers actuel, la constante de Hubble.

En 2003, WMAP a réalisé sa première mesure de H_0 , 72 ± 5 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Parfait! Cette valeur était compatible avec celle du télescope Hubble, avec l'avantage d'une barre d'erreurs plus petite. Mais les mesures successives de WMAP ont révélé une fâcheuse tendance à la baisse (70 en 2011). Ce n'était pas encore un problème: les incertitudes de SH0ES et WMAP se recouvraient encore autour de 72 kilomètres par seconde et par mégaparsec.

LA CRISE S'INSTALLE

Mais en 2013, les barres d'erreur se réduisaient encore et se touchaient à peine: le résultat de SH0ES était de 74 ± 2 et celui de WMAP 70 ± 2 . Le climat n'était pas encore à l'inquiétude, les deux méthodes étant encore compatibles avec une valeur d'environ 72. Avec l'amélioration des méthodes d'analyse et des techniques, on s'attendait à voir les valeurs converger.