

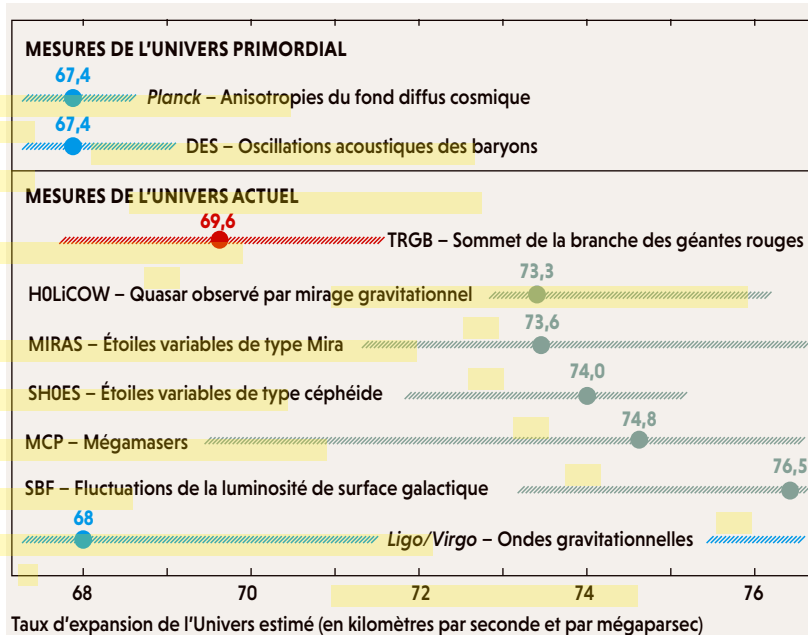
> standard étaient des étoiles céphéides variables, des astres dont la brillance augmente et diminue avec une période qui est reliée à leur luminosité absolue. En trouvant une valeur intermédiaire de 72 ± 8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, cette équipe a tranché en plein milieu du débat et a 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 (*Supernovæ, H₀ for the equation of state of dark energy*). Cette équipe a utilisé à la fois les céphéides et les supernovæ 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.

C'est alors, en 2014, que le successeur de WMAP, l'observatoire spatial *Planck*, a annoncé sa première estimation de la constante de Hubble: $67,4 \pm 1,4$. Les incertitudes ne se recouvraient plus, l'écart était même bien marqué. Et les résultats suivants de *Planck* n'ont fait que confirmer ce résultat. Pire, la barre d'erreur est tombée à 1, puis, en 2018, elle n'était plus que de 0,5.

Dans le jargon scientifique, on parle alors de «tension» pour décrire ce genre de situation où deux mesures sont inconciliables. C'était d'ailleurs le titre d'une conférence à l'institut Kavli de physique théorique, à Santa Barbara, en Californie, à l'été 2019: «Tensions entre l'Univers jeune et l'Univers actuel». Adam Riess était le premier à présenter ses résultats. À la fin de son séminaire, il s'est tourné vers David Gross, spécialiste de la physique des particules et lui aussi Prix Nobel, et lui a demandé ce qu'il en pensait: «Avons-nous une tension ou avons-nous un problème?»

UNE CONFÉRENCE SOUS TENSION

David Gross a d'abord prudemment répondu que la nuance est un peu «arbitraire», avant d'ajouter: «mais oui, je pense qu'on peut parler de problème». Vingt minutes plus tard, après la séance de questions, il a amendé sa remarque: «En physique des particules, on ne parlerait ni de tension ni de problème, mais plutôt de crise.» Adam Riess a conclu la discussion sur ces mots: «Chers collègues, nous sommes en situation de crise.»

Le problème vient-il de la construction de l'«échelle cosmique des distances» à partir des chandelles standard? Une telle échelle s'étendant de plus en plus loin dans l'Univers est aussi robuste que chacun de ses échelons, les chandelles standard. Il n'est pas impossible que des erreurs se cachent dans cette approche.

Lors de la conférence à l'institut Kavli, ce point a été longuement débattu. Pendant la conférence, Wendy Freedman et son équipe ont publié un résultat très différent de celui de SHOES en utilisant un autre type de chandelle

standard: certaines étoiles géantes rouges. Celles-ci brillent de plus en plus jusqu'à atteindre un pic quand l'hélium de leur cœur commence à fusionner. Ce «flash d'hélium» commun à toutes les géantes rouges peut servir de chandelle standard. Par cette approche, l'équipe de Chicago est parvenue à une valeur qui se trouve à mi-distance de l'intervalle défini par la crise actuelle: $69 \pm 0,8$ kilomètres par seconde et par mégaparsec (une valeur qui n'offre aucun recouvrement des incertitudes, ni avec SHOES ni avec *Planck*).

L'idée de Wendy Freedman est que les céphéides ne sont pas des chandelles standard très fiables. On trouve ces étoiles dans des régions denses en astres et souvent riches en poussière. Or cette dernière, en occultant une partie de la lumière des étoiles, donne l'impression qu'elles sont plus distantes qu'elles ne le sont réellement. À l'inverse, les géantes rouges sont de vieilles étoiles que l'on trouve plutôt en périphérie de la Galaxie, dans des régions pauvres en poussière.

Pour certains spécialistes de l'approche par l'échelle des distances, la date de publication de l'article de Wendy Freedman a été vécue comme une provocation, car elle ne leur laissait pas le temps d'analyser la méthode pour y apporter une réponse circonstanciée lors de la conférence.

Cette réponse est venue trois semaines plus tard. La méthode utilisée par l'équipe de Wendy Freedman «constitue une chandelle standard prometteuse pour mesurer les distances extragalactiques», commencent de façon très diplomatique les auteurs de l'article avant de s'attaquer vivement à l'analyse des erreurs systématiques. De leur point de vue, le résultat de Wendy Freedman était entaché d'incertitudes. En particulier, les astronomes avaient calibré leurs géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie dont la distance est bien connue mais qui est très poussiéreuse. En réinterprétant les données sur les géantes rouges, Adam Riess et ses collègues trouvaient un bon accord avec leurs propres données: ils en déduisaient une constante de Hubble égale à $72,4 \pm 1,9$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Pour Wendy Freedman, cette réinterprétation de sa méthode était inexacte. Avec son équipe, elle a pris en compte les critiques. Et en février 2020, ces chercheurs ont publié de nouveaux résultats en utilisant aussi des calibrages de géantes rouges dans deux autres galaxies, IC 1613 et le Petit Nuage de Magellan, peu poussiéreuses mais dont les distances sont moins bien connues. L'équipe de Wendy Freedman a vérifié qu'ils arrivaient correctement à prendre en compte l'effet de la poussière et avaient des résultats cohérents. Mais au lieu de se rapprocher de la valeur de SHOES, >



En physique des particules, on parlerait plutôt de crise

David Gross