



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DE LA PROBITÉ AVANT TOUT

Le baromètre 2020 de la confiance des Français envers les politiques et leurs institutions souligne l'importance accordée à l'honnêteté des gouvernants.



La démocratie représentative est le seul régime politique où le consentement des gouvernés est nécessaire à son fonctionnement. Par le vote, les citoyens choisissent un candidat et valident les institutions qui composent ce régime. Aussi, la mesure scientifique de la confiance politique est indispensable pour en évaluer la solidité.

Depuis 2009, le Centre de recherches politiques de SciencesPo (Cevipof) publie chaque année un baromètre annuel de confiance politique qui repose sur un échantillon représentatif de la population française prenant en compte les critères de sexe, d'âge, de catégorie socioprofessionnelle, de région et de taille d'agglomération. Il dévoile les niveaux de confiance envers les responsables politiques et les institutions qui caractérisent l'État au travers de ses fonctions régaliennes (armée, police, justice), représentatives (municipalités, régions, nation, Europe), et sociales (hôpitaux, écoles, associations). La dernière enquête a été réalisée en février 2020.

Les fonctions de proximité (le maire, les PME) et celles dédiées à la protection (hôpitaux, armée) récupèrent les taux de confiance les plus élevés. En bas de l'échelle, un quart des personnes interrogées ont globalement confiance dans le gouvernement, les syndicats ou les médias, et 13% dans les partis politiques. Les institutions et les fonctions locales

Seuls 13% des sondés ont globalement confiance dans les partis politiques

sont donc plus populaires que celles qui touchent de près le pouvoir politique.

Si cette tendance générale confirme celle des années précédentes, les résultats du baromètre permettent de saisir les ressorts profonds de la représentativité du corps social, c'est-à-dire ce qui motive les gouvernés à consentir au pouvoir des gouvernants. Depuis plusieurs années, près des

trois quarts des sondés considèrent que le personnel politique est plutôt corrompu.

Concernant les qualités attendues des gouvernants, l'«honnêteté» arrive en tête de liste pour les deux tiers des sondés, tandis que la «bonne connaissance des dossiers» ne touche que 28% d'entre eux. L'ordre d'importance donné à ces critères révèle que la confiance au sens de l'anglais *trust*, qui repose sur le pari du comportement coopératif d'autrui, est une dimension beaucoup plus importante que celle, générique et impersonnelle, de confiance au sens de l'anglais *confidence*, qui s'appuie sur la compétence.

En outre, seuls un quart des sondés considèrent qu'il est important que le personnel politique soit «proche de gens» comme eux. La perception de la probité n'est donc pas liée à l'idée d'un rapprochement affinitaire entre les représentés et les élus.

Quels enseignements tirer de ces résultats? L'un est que les réformes visant à faire correspondre la composition de nos assemblées politiques à la diversité du corps social dans toutes ses composantes (instauration de quotas, procédures participatives sur des questions aux enjeux sociaux complexes...) ne permettent pas de réduire la défiance. En effet, la solidité du système représentatif repose sur une démarcation nette entre l'État et la société, démarcation que la recherche d'homologie entre élus et citoyens tend à brouiller.

En revanche, la probité reconnue des mandataires de l'État est une valeur démocratique incontestable. Cette exigence est renforcée par une profonde mutation du rapport des citoyens au politique. Comme l'a analysé Luc Rouban, chercheur au Cevipof, la perception de l'intérêt général est fragilisée par un appel accru à la démocratie directe, à la temporalité immédiate, pour satisfaire des demandes multiples. L'essor de cette nouvelle culture politique définit ce qu'il appelle *La Matière noire de la démocratie* (Presses de SciencesPo, 2019). ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

*DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE*



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

> En utilisant deux techniques différentes pour mesurer la constante de Hubble, qui correspond à la vitesse actuelle d'expansion de l'Univers, les chercheurs obtiennent deux résultats incompatibles.

> Une méthode utilise des étoiles et des supernovæ dans l'Univers actuel et remonte

vers le passé. L'autre analyse la lumière émise peu après le Big Bang et revient vers le présent.

> L'origine du désaccord, théorique ou expérimentale, reste à déterminer.

L'AUTEUR



RICHARD PANEK
journaliste scientifique,
auteur notamment de
The 4 Percent Universe
(Mariner Books, 2011)

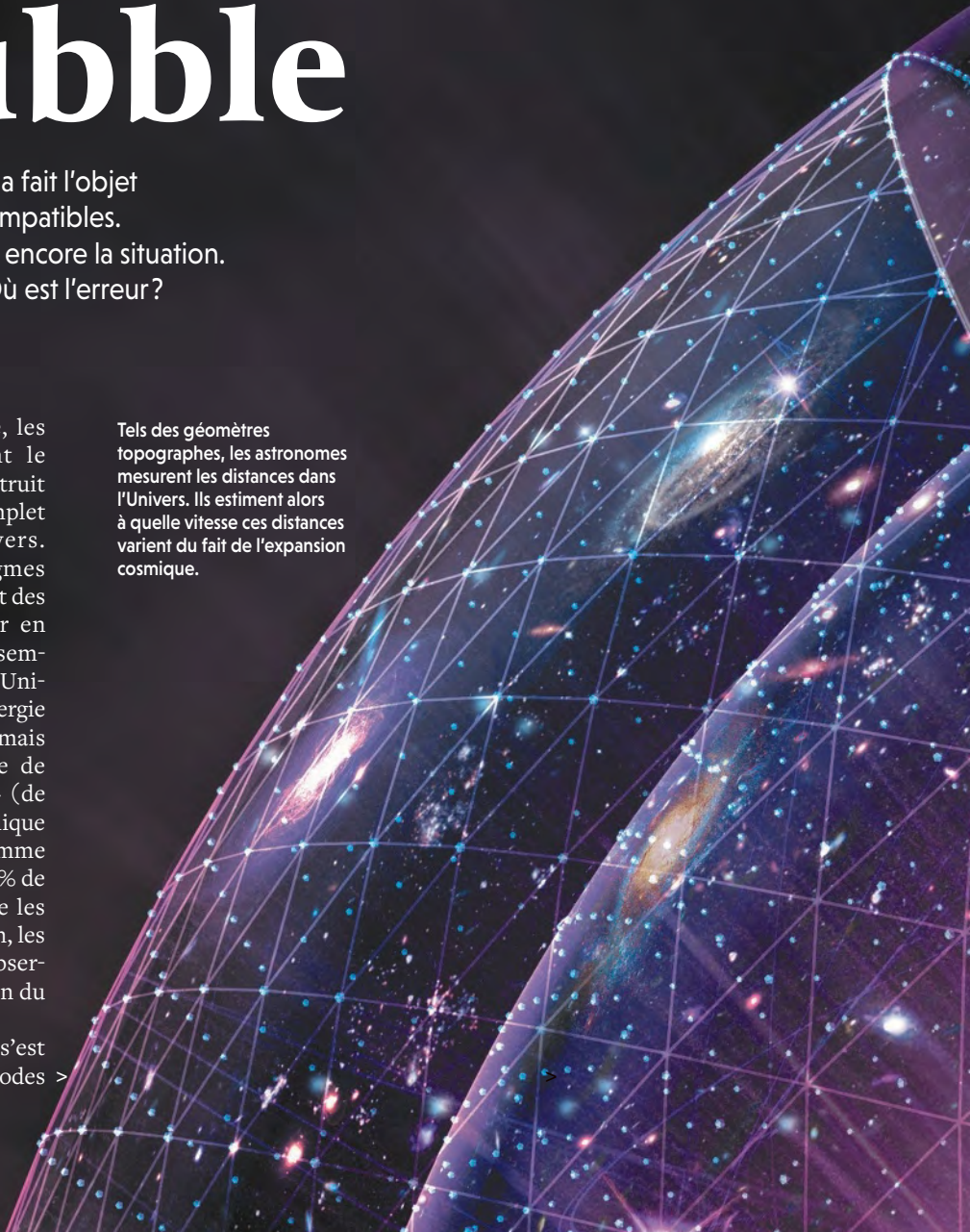
La crise cosmique de la constante de Hubble

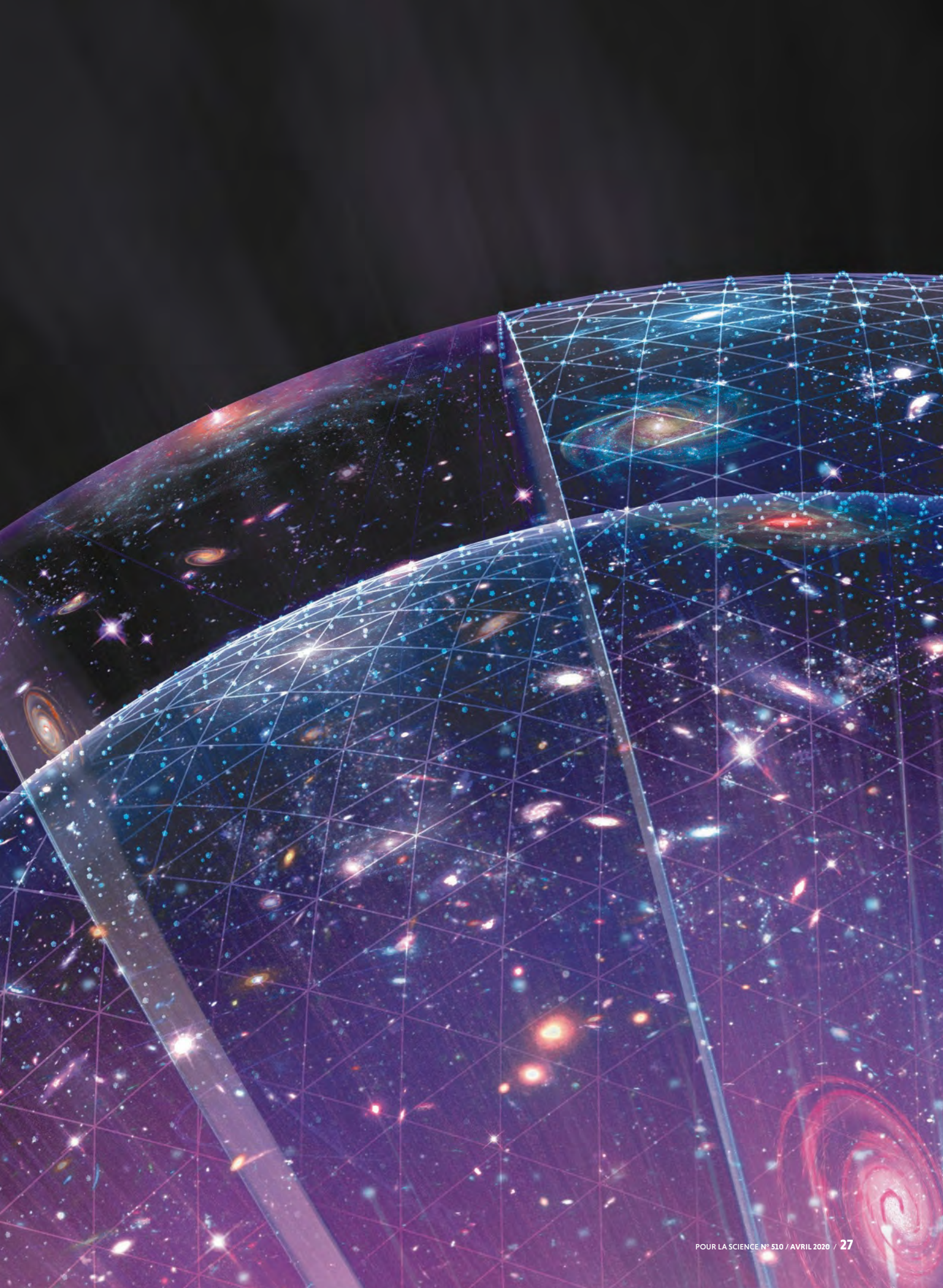
La vitesse d'expansion de l'Univers a fait l'objet de deux mesures aux résultats incompatibles. Une troisième vient de compliquer encore la situation. Chacune semble pourtant fiable. Où est l'erreur ?

Vers la fin du xx^e siècle, les cosmologistes avaient le sentiment d'avoir construit un modèle presque complet pour décrire l'Univers. Certes, quelques énigmes subsistaient. Bien sûr, le modèle invoquait des concepts qui restent encore à étudier en détail. Mais de façon globale, ce cadre semblait offrir un tout solide et cohérent : l'Univers contiendrait environ deux tiers d'« énergie sombre » (de nature encore inconnue, mais qui expliquerait l'expansion accélérée de l'Univers), un quart de « matière noire » (de nature également inconnue, mais qui explique l'évolution des structures cosmiques comme les galaxies et amas de galaxies), et 4 à 5 % de matière « ordinaire » (celle qui compose les êtres vivants, les objets de notre quotidien, les planètes, les étoiles, etc.). Toutes les observations tendaient à confirmer cette vision du monde. Toutes ? Non...

Ces dernières années, un désaccord s'est fait jour entre les résultats de deux méthodes >

Tels des géomètres topographes, les astronomes mesurent les distances dans l'Univers. Ils estiment alors à quelle vitesse ces distances varient du fait de l'expansion cosmique.





> différentes de mesure de la vitesse d'expansion de l'Univers, un paramètre nommé « constante de Hubble » et noté H_0 . Les approches partant d'observations dans l'Univers actuel et remontant le temps jusqu'aux âges les plus reculés donnent une certaine valeur; et les techniques partant de l'Univers jeune pour revenir jusqu'à aujourd'hui en donnent une autre.

UNE FAIBLE DIFFÉRENCE, MAIS INCONCILIABLE

À première vue, la différence entre les deux valeurs semble minime: respectivement 67,4 et 74,0 kilomètres par seconde et par mégaparsec (1 mégaparsec correspond à 3,26 millions d'années-lumière). Cela signifie que dans chaque direction, sur une distance de 1 mégaparsec, l'Univers s'étire toutes les secondes d'environ 70 kilomètres. Rapporté aux échelles de l'espace-temps de l'Univers, l'écart entre les deux mesures devient d'une importance cosmique cruciale. Grâce à ce paramètre, les cosmologistes extrapolent vers le passé l'évolution de l'Univers et en déduisent son âge, environ 13,8 milliards d'années. Ils l'utilisent aussi pour se projeter dans le futur et déterminer quand l'espace entre les galaxies deviendra si vaste que le cosmos autour du voisinage immédiat de la Voie lactée semblera totalement vide. Les chercheurs espèrent également, en disposant d'une mesure précise de la constante de Hubble, éclaircir la nature de l'énergie sombre.

Malgré les efforts des scientifiques, les deux stratégies pour mesurer la constante de Hubble persistent à fournir des valeurs différentes. Cette situation n'est pas rare en science. Mais en général, une analyse fine suffit pour faire disparaître les incompatibilités. Ces dix dernières années, les cosmologistes portaient du principe qu'il en serait de même pour la constante de Hubble. Mais le désaccord a persisté et, surtout, il s'est aggravé. Les mesures successives des uns et des autres n'ont fait que renforcer le fossé qui sépare les deux résultats. Qui plus est, d'autres équipes qui ont adopté des approches indépendantes ont compliqué la situation. Aujourd'hui, les cosmologistes s'accordent sur un point: nous avons un problème!

Où se cache l'erreur? S'est-elle glissée quelque part dans les mesures ou dans leur interprétation? Les chercheurs y travaillent, mais ces pistes semblent peu probables. Cela ne laisse qu'une dernière option, tout aussi peu probable mais de plus en plus à considérer: l'erreur se nicherait dans le modèle standard de la cosmologie.

Pendant une grande partie de l'histoire humaine, « l'étude » des origines du monde était une affaire de mythes et de légendes, sur le mode « Au commencement... ». Ce n'est qu'en 1925 que l'astronome américain Edwin



Les astronomes ont calibré les céphéides et les géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan

Hubble a fait entrer ces grandes questions fondamentales dans le domaine de la recherche empirique. Il venait de résoudre une énigme vieille de plusieurs siècles et relative à la nature de taches floues sur la voûte céleste – que les astronomes nommaient des nébuleuses. Ces nébuleuses étaient-elles des nuages de gaz entre les étoiles? Ou ces nébuleuses étaient-elles des sortes d'« univers-îles », au-delà des étoiles? Grâce à ses observations, Hubble a montré que l'une des nébuleuses se trouve beaucoup plus loin que les étoiles visibles: nous vivons dans un univers-île, la Voie lactée, et la nébuleuse en question est une galaxie voisine, celle d'Andromède.

Hubble a continué à bouleverser la vision du monde de ses contemporains. En analysant



Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine voisine de la Voie lactée dont la distance est connue avec précision.

la lumière provenant de plusieurs de ces fameuses nébuleuses, il a constaté que leur spectre électromagnétique était étiré vers les grandes longueurs d'onde. On parle de décalage vers le rouge (couleur correspondant aux plus grandes longueurs d'onde du spectre visible). Ce phénomène s'explique par l'effet Doppler: les ondes émises par une source sont décalées en fréquence (ou en longueur d'onde) quand cette source se déplace par rapport à l'observateur. Le résultat de Hubble impliquait donc que les nébuleuses s'éloignaient de la Terre et de la Voie lactée. En 1927, le physicien et chanoine belge Georges Lemaître a noté que si l'Univers était en expansion, on devrait constater que plus une galaxie est éloignée, plus le décalage vers le rouge de sa lumière est important. Ainsi, plus elle est lointaine et plus elle s'éloigne vite. En 1929, en accumulant plus de mesures, Hubble est parvenu à la même conclusion: l'Univers est en expansion.

Les physiciens se sont aussitôt demandé ce qui se passerait si on remontait le temps et regardait cette expansion à l'envers. Les galaxies se rapprocheraient les unes des autres, formeraient un état très dense d'où serait né l'Univers. Très vite, quelques théoriciens ont suggéré que cet état aurait marqué la naissance de l'espace et du temps, un phénomène qui prendra plus tard le nom de Big Bang. Cette dénomination se voulait initialement péjorative, car l'idée semblait bien trop fantasque. Pendant plusieurs décennies, en l'absence de preuves expérimentales, les physiciens étaient dans l'incapacité de soutenir solidement cette théorie.

La situation a changé en 1965 quand Arno Penzias et Robert Wilson, des laboratoires Bell, ont pointé leur antenne radio vers le ciel. Ils ont capté un rayonnement homogène provenant de toutes les directions. Or depuis 1948, des physiciens comme Ralph Alpher, Robert Herman et d'autres avaient considéré que si l'Univers avait émergé d'un état primordial très dense et très chaud, il se serait refroidi lors de son expansion et aurait émis une lumière caractéristique dans sa jeunesse. Ils avaient théoriquement calculé que la température associée à ce rayonnement serait de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. Or, avec une mesure d'environ 3 kelvins, Penzias et Wilson avaient apporté une preuve suffisante pour convaincre les cosmologistes et établir un consensus autour du modèle du Big Bang.

En 1970, l'astronome Allan Sandage, un proche de Hubble, a publié un article dans la revue *Physics Today* qui a profondément marqué de son empreinte la recherche en cosmologie et qui était intitulé «Cosmologie: La quête de deux nombres». Le premier nombre était la vitesse d'expansion actuelle de

l'Univers. Le second, l'accélération de l'expansion. À l'époque, on pensait que la vitesse d'expansion devait diminuer, l'Univers étant rempli de matière qui agit gravitationnellement sur elle-même et qui constituerait donc un frein à l'expansion. On parlait donc plutôt de paramètre de décélération.

C'est le second nombre qui a été mesuré en premier. À la fin des années 1980, deux équipes se sont lancées dans son estimation en utilisant les mêmes outils, mais de façon indépendante: les supernovæ de type Ia, des étoiles massives qui explosent en fin de vie et que les astrophysiciens pensaient utiliser comme «chandelles standard». Le principe est le même que lorsque l'on considère une ampoule de 60 watts, qui semble moins lumineuse si on la regarde de plus loin: si l'on sait que l'ampoule a une puissance de 60 watts, on est capable de déterminer sa distance à partir de sa luminosité apparente.

S'ÉCLAIRER AVEC DES CHANDELLES STANDARD

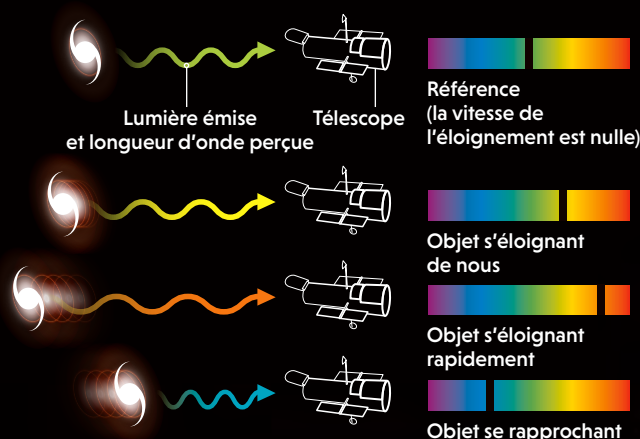
Les cosmologistes savent déterminer la luminosité intrinsèque des supernovæ de type Ia (l'équivalent du «60 watts») et sont donc capables de les utiliser pour mesurer des distances cosmiques. Mais si la vitesse d'expansion a diminué au cours du temps, comme le pensaient les astronomes, alors aux grandes distances une supernova serait moins éloignée et donc plus brillante que si l'Univers a enflé à un rythme constant. Or les deux équipes ont constaté l'inverse: les supernovæ les plus lointaines étaient moins brillantes que prévu et étaient donc plus éloignées qu'on ne l'attendait. En 1998, les chercheurs ont conclu que l'expansion de l'Univers accélère. La source de cette accélération est ce qu'on nomme l'«énergie sombre» (ou «noire»), terme générique et temporaire en attendant d'en déterminer la vraie nature.

La constante de Hubble, le premier nombre de Sandage, a été estimée avec une bonne précision peu après. Pendant plusieurs décennies, ce paramètre a été la source de débats animés parmi les astronomes. Sandage lui-même avait affirmé que H_0 vaudrait autour de 50 kilomètres par seconde et par mégaparsec, valeur qui porterait l'âge de l'Univers à environ 20 milliards d'années. D'autres astronomes penchaient plutôt pour une constante de Hubble proche de 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec, soit un âge cosmique d'environ 10 milliards d'années. Une telle différence était embarrassante; il fallait réduire cette incertitude.

En 2001, Wendy Freedman, de l'université de Chicago, et ses collègues ont utilisé le télescope spatial Hubble pour réaliser la première mesure fiable de la constante de Hubble. Dans ce projet, les chandelles ➤

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.

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.

Big Bang

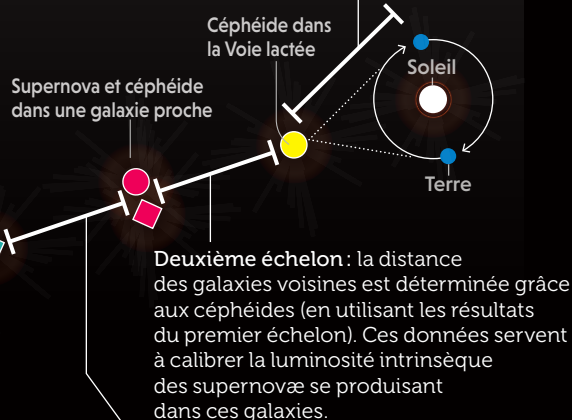
Fond diffus cosmologique

Aujourd'hui

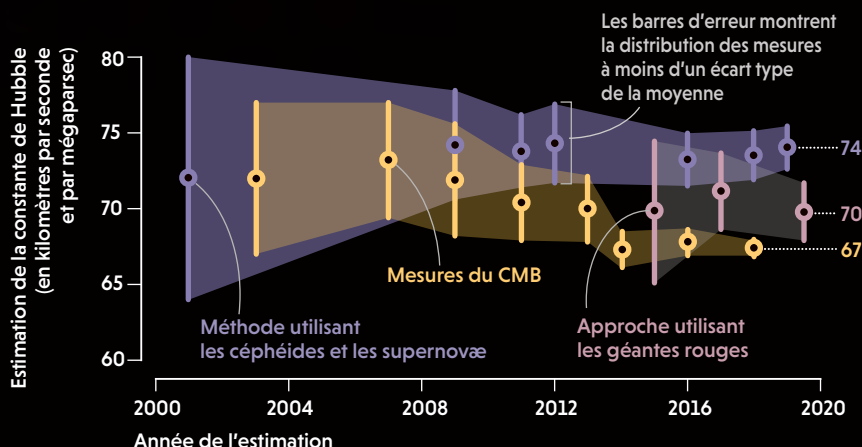
ESCALADER L'ÉCHELLE DES DISTANCES

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.



Troisième échelon : on calcule la distance des galaxies lointaines avec les supernovæ.



UN DÉSACCORD QUI SE CREUSE

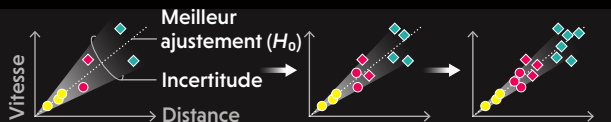
La mesure fondée sur le CMB donne $H_0 = 67$ (en kilomètres par seconde et par mégaparsec, 1 mégaparsec vaut 3,26 millions d'années-lumière). Le résultat calculé avec les céphéides est $H_0 = 74$. Une nouvelle méthode utilisant des étoiles géantes rouges dont les éruptions ont une luminosité intrinsèque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

VERS UNE RÉCONCILIATION... OU DE LA NOUVELLE PHYSIQUE

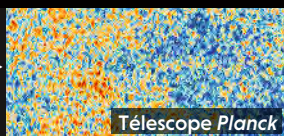
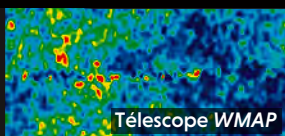
Les chercheurs améliorent en permanence la précision de leur estimation de la constante de Hubble. Ils réduisent leurs incertitudes dans l'espoir de voir les résultats converger. Des télescopes plus grands observent des céphéides plus lointaines dans l'Univers, le satellite *Planck* a considérablement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

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



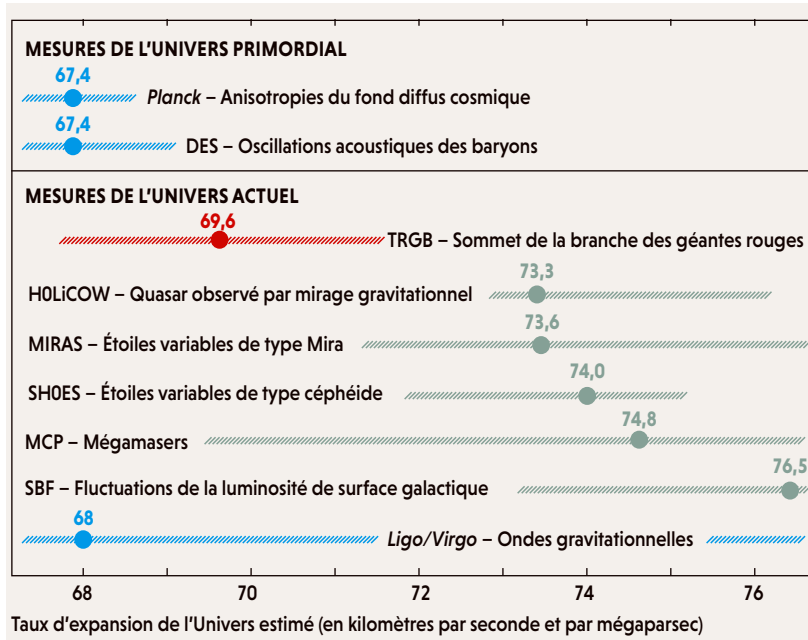
> standard étaient des étoiles céphéides variables, des astres dont la brillance augmente et diminue avec une période qui est reliée à leur luminosité absolue. En trouvant une valeur intermédiaire de 72 ± 8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, cette équipe a tranché en plein milieu du débat et a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

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

> leur nouvelle valeur pour la constante de Hubble s'en écarte encore plus : $69,6 \pm 1,9$ kilomètres par seconde et par mégaparsec, à un jet de pierre de la valeur donnée par *Planck*. Adam Riess et ses collègues continuent d'examiner la méthode.

Ces échanges, parfois animés, entre les astronomes qui s'appuient sur des chandelles standard confortent les physiciens des particules dans l'idée que le problème prend sa source dans les incertitudes de la construction de l'échelle cosmique des distances. Mais comment affirmer que les analyses du fond diffus cosmologique sont exemptes d'erreurs ? Peu d'astronomes pensent que le problème se situe dans les données de *Planck*. Les physiciens estiment d'ailleurs avoir atteint le seuil de sensibilité maximal pour des observatoires spatiaux étudiant le fond diffus cosmologique. Et des mesures indépendantes du fond diffus – par le télescope du pôle Sud (*SPT*) par exemple – confirment la robustesse de ces mesures.

Dès lors, si la source de la tension n'est pas dans les observations de l'Univers jeune ou actuel, alors les cosmologistes n'ont pas d'autres solutions que de se pencher sur la troisième piste, celle d'une « nouvelle physique », c'est-à-dire des forces ou phénomènes dont l'explication échappe à notre compréhension actuelle du monde. Les cosmologistes ont commencé à considérer des idées radicales selon lesquelles le modèle standard de la cosmologie n'est pas aussi complet qu'ils le pensaient.

Un élément qui pourrait jouer sur notre compréhension de l'expansion cosmique est l'incertitude sur le contenu en particules de l'Univers. Pour certains scientifiques, cette idée n'est pas sans rappeler le « problème des neutrinos solaires », une querelle qui a duré plusieurs décennies à propos des neutrinos électroniques, des particules émises notamment par le Soleil.

Les théoriciens avaient calculé un certain flux de neutrinos, les détecteurs en enregistraient un autre. Les physiciens suspectaient qu'il s'agissait d'erreurs systématiques dans les observations. Les astronomes mettaient en question la théorie décrivant les processus de production de neutrinos au cœur du Soleil. Comme pour la constante de Hubble, aucune solution ne semblait émerger, ni d'un côté ni de l'autre. Jusqu'à ce que, à la fin du millénaire, des chercheurs découvrent que les neutrinos ont une masse. En prenant en compte ce résultat, les physiciens ont compris que les neutrinos « oscillaient » d'une identité à une autre : les neutrinos électroniques se transformaient de façon cyclique en d'autres types de neutrinos auxquels les détecteurs n'étaient pas sensibles. Un ajustement similaire, par exemple une nouvelle variété de neutrinos présents dans l'Univers jeune, qui modifierait



Le modèle standard de la cosmologie n'est peut-être pas aussi complet qu'on le pensait

la distribution de l'énergie et des masses dans le plasma primordial, apporterait une correction à la valeur de la constante de Hubble.

Une autre piste concerne l'énergie sombre. Dans le modèle standard de la cosmologie, on considère que la densité de l'énergie sombre est constante. Mais ce n'est pas nécessairement le cas. Dès lors, l'influence de cette forme d'énergie sur l'expansion de l'Univers a pu varier au cours du temps. Une idée qui n'est pas déraisonnable, dans la mesure où les cosmologistes ne connaissent pas la nature exacte de cette composante de l'Univers.

DES DONNÉES À VENIR

Dans les deux prochaines années, les astronomes disposeront de données recueillies par l'observatoire spatial *Gaia*, de l'Agence spatiale européenne. Celui-ci mesure avec une précision jamais atteinte la distance de plus d'un milliard d'étoiles dans la Voie lactée. Cela permettra de vérifier que les chercheurs utilisent les bonnes valeurs pour calibrer le premier échelon de leur édifice cosmique. Si ce n'est pas le cas, le problème aura bien été celui d'une erreur systématique. Pendant ce temps, les théoriciens continuent à travailler sur de nouvelles extensions du modèle du Big Bang, même si, jusqu'à présent, aucun modèle concurrent ne résiste mieux que la version standard à un examen poussé.

Le modèle standard de la cosmologie reste l'un des plus grands succès de la science moderne. En cinquante ans, ce cadre a évolué, partant de vagues idées spéculatives pour donner des idées quasi certaines. Il n'est peut-être pas aussi complet que les cosmologistes le pensaient il y a à peine quelques années, mais il reste un bon exemple du bon fonctionnement de la science : les chercheurs obtiennent des résultats dont ils éprouvent la fiabilité, cherchent de nouvelles pistes et poursuivent chaque indice pour avancer. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. L. Freedman et al., **Calibration of the tip of the red giant branch (TRGB)**, à paraître dans *Astrophys. J.*, 2020.

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.

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.

Collab. *Planck*, **Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters**, en ligne le 17 juillet 2018.

DURÉE LIBRE

43 %
de réduction *

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z