

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.