

Un problème de vitesse



Lors d'un congrès de cosmologie, les plus grands astrophysiciens ont présenté pas moins de cinq nouvelles mesures de la vitesse de l'expansion de l'Univers. Toutes différentes! Comment s'y retrouver?

E

n 1998, deux équipes de cosmologistes scrutent des supernovæ lointaines et constatent qu'elles s'éloignent de la Terre de plus en plus vite. Une conclusion s'impose: contrairement à ce que l'on pensait, l'expansion de l'Univers accélère. Pour l'expliquer, on invoqua alors une «énergie sombre» répulsive qui représenterait deux tiers de tout ce que l'Univers contient! Outre l'accélération de l'expansion cosmique, ce nouvel ingrédient a eu pour effet l'attribution du prix Nobel de physique 2011 à ses découvreurs Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess. Et de soulever d'innombrables questions! >

© Patryk Hardziej for Quanta Magazine

> Pour quelques éléments de réponse, retrouvons-nous ce lundi matin ensoleillé du mois de juillet 2019, à Santa Barbara, Californie. Là, des cosmologistes parmi les plus éminents se sont réunis pour discuter d'un problème épineux, et crucial. Vêtu d'une chemisette à carreaux, Adam Riess, désormais cinquantenaire, s'avance sur la scène, devant une salle pleine à craquer, pour son discours d'ouverture. Il y rend publics ses derniers résultats selon lesquels l'Univers s'étend actuellement trop vite, en tout cas plus vite que ne le prévoient les théories fondées sur ce que l'on sait des premiers jours de l'Univers. «Si le présent et le passé de l'Univers sont en désaccord, ne devrions-nous pas envisager une nouvelle physique?» déclare-t-il.

L'enjeu? Rien de moins que le modèle standard de la cosmologie, dominant depuis la découverte de l'énergie sombre. Ce modèle, noté Λ CDM, décrit toute la matière et l'énergie visible de l'Univers, ainsi que l'énergie sombre, représentée par la lettre grecque Λ , et la matière noire dite «froide», notée CDM, pour *cold dark matter*, par opposition aux matières noires chaude HDM et tiède WDM (voir l'entretien avec Jean-Pierre Luminet, page 10). Le modèle décrit également l'évolution de chacun de ces composants sous l'influence de la gravitation telle que prévue par la relativité générale d'Albert Einstein.

Le modèle Λ CDM rend parfaitement compte des caractéristiques de la jeunesse de l'Univers, des informations déduites de l'étude du «fond diffus cosmique», un rayonnement électromagnétique (dans le domaine des microondes), émis lorsque l'Univers n'était âgé que de 380 000 ans, au moment de la formation des premiers atomes. Depuis la première carte de ce rayonnement fossile, établie par le télescope spatial *Planck* en 2013, les astrophysiciens ont reconstitué avec précision l'Univers primordial et ont déroulé le film de son évolution jusqu'à aujourd'hui, afin notamment de prédire le taux actuel d'expansion cosmique, c'est-à-dire la constante de Hubble, ou H_0 .

Selon les données de *Planck*, l'Univers s'étend à raison de 67,4 kilomètres par seconde par mégaparsec, un mégaparsec valant 3,26 millions d'années-lumière. En d'autres termes, lorsque vous regardez dans le cosmos, pour chaque mégaparsec de distance parcourue, l'espace devrait reculer plus vite de 67,4 kilomètres par seconde. Les mesures d'autres caractéristiques de l'Univers primordial, comme les «oscillations acoustiques des baryons», fournissent exactement la même valeur: $H_0 = 67,4$. Mais d'autres observations sont en désaccord.

En effet, peu avant la conférence, l'équipe H0LiCOW a publié une nouvelle mesure de

la constante. À la lumière de six quasars lointains et de leurs images à travers des lentilles gravitationnelles, l'équipe a déterminé que H_0 était égale à 73,3 kilomètres par seconde par mégaparsec, une valeur significativement supérieure à celle de *Planck*. Mais, plus important, cette nouvelle mesure était proche de celle obtenue par l'équipe d'Adam Riess, surnommée SH0ES, sur la base de l'étude des Céphéides, des étoiles à luminosité pulsante situées dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la Voie lactée. La mesure la plus récente, datant de mars 2019, fixait H_0 à 74,0, une valeur comprise dans la marge d'erreur de l'équipe H0LiCOW. «Mon cœur s'est mis à palpiter», se souvient Adam Riess, en apprenant les résultats de l'équipe H0LiCOW, deux semaines avant le congrès de Santa Barbara.

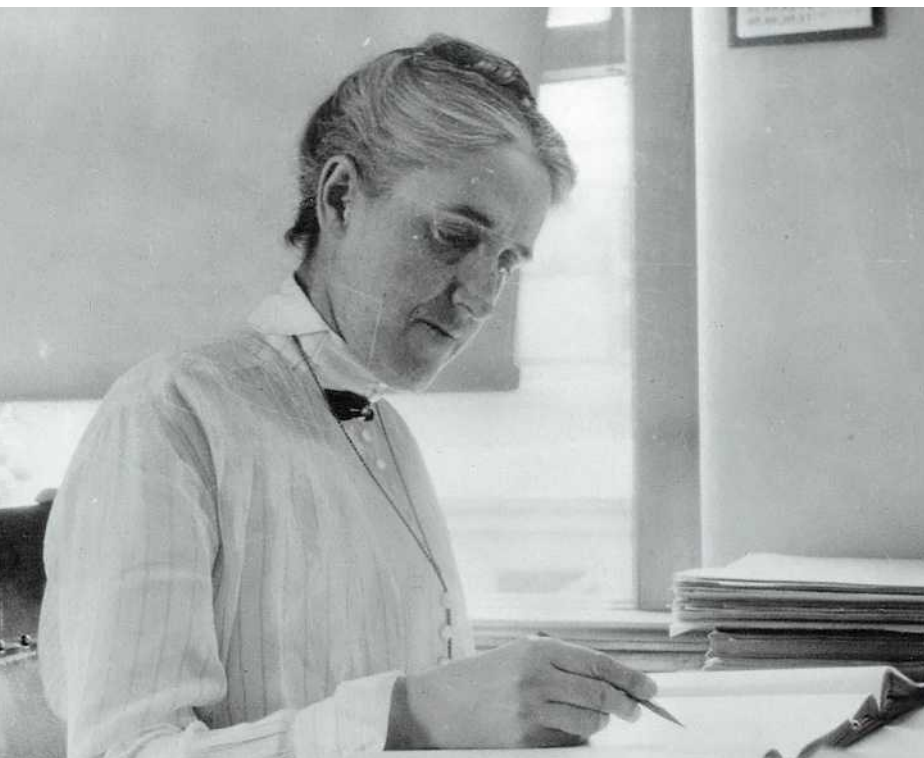
TENSION, CRISE OU PROBLÈME

Six ans durant, l'équipe SH0ES a contesté, en vain, les valeurs de H_0 déterminées à partir de l'Univers primordial. Désormais, les mesures combinées des équipes SH0ES et H0LiCOW ont franchi un seuil statistique, dit des «cinq sigma», de fiabilité. C'est la porte ouverte à une nouvelle approche de la physique. Si la constante de Hubble n'est pas égale à 67, mais plutôt à 73 ou 74, on en déduit qu'il manque quelque chose au modèle Λ CDM, un facteur qui accélère encore plus qu'attendu l'expansion cosmique. Ajouté aux ingrédients déjà connus (matière baryonique, matière

Cette tension est peut-être l'élément que beaucoup attendaient pour ébranler le modèle Λ CDM

noire et énergie sombre), ce composant supplémentaire enrichirait la cosmologie avec une approche inédite, obligeant à dépasser le modèle Λ CDM.

Durant son discours, Adam Riess s'est exprimé sur le «gouffre» qui sépare 67 et 73:



Henrietta Swan Leavitt à son bureau de l'observatoire de l'université Harvard. Elle a découvert comment les étoiles céphéides, à la luminosité oscillante, pouvaient aider à déterminer la vitesse d'expansion de l'Univers.

«Cet écart semble robuste. Lorsque j'évoquais la situation, je parlais d'une simple *tension*, mais on peut désormais parler de *problème*.» Invité à prendre la parole, David Gross, physicien des particules et lui aussi lauréat du prix Nobel, a surenchéri en voyant plutôt une *crise*. «Alors, nous sommes en *crise*», a confirmé Adam Riess.

Pour les cosmologistes, une crise représente l'occasion de découvrir quelque chose d'important. Lloyd Knox, membre de l'équipe Planck, s'exprimant après Adam Riess, s'est voulu optimiste : «Cette tension à propos de la constante de Hubble est peut-être l'élément que beaucoup d'entre nous attendaient pour ébranler le modèle Λ CDM.»

En fin de journée, de nombreux participants se sont entassés dans un car en direction de l'hôtel. Entre océan et montagnes, nous roulions au milieu des palmiers. Wendy Freedman, pionnière de la constante de Hubble, était installée au second rang. Aujourd'hui âgée de 62 ans, cette femme dirigeait l'équipe qui a obtenu la première mesure de H_0 en 2001 : 72 avec une précision de 10%. Elle semblait moins atteinte par la contradiction apparente, contrairement à la plupart des autres conférenciers, qui semblaient ne plus tenir en place. «Il nous reste encore du travail», a-t-elle lâché, mâchant presque ses mots.

Wendy Freedman a passé des décennies à améliorer les mesures de H_0 en utilisant la méthode de l'«échelle de distance cosmique» : l'idée consiste à prendre un ensemble d'objets situés à des distances connues (ils forment les

barreaux de l'échelle) et à en étudier l'éloignement pour mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers. Elle a calibré autant que possible cette échelle à l'aide des céphéides. Mais elle s'inquiète de potentielles sources d'erreur. «Elle sait dans quels placards sont cachés les squelettes», explique Barry Madore, son mari et proche collaborateur.

Pour calibrer une nouvelle échelle de distance cosmique, le couple et leurs collègues du *Carnegie-Chicago Hubble Program* (CCHP) ont utilisé le «sommet de la branche des géantes rouges» (noté TRGB pour *tip of the red giant branch*). Ce «sommet» correspond à un point de bascule des étoiles comme notre Soleil en fin de vie. Gonflées et rouges, elles deviennent de plus en plus lumineuses jusqu'à atteindre un bref pic de luminosité dû à l'embrasement soudain de l'hélium contenu dans leur cœur (on parle de «flash de l'hélium»). Dès 1993, Wendy Freedman, Barry Madore et Myung Gyoon Lee ont compris que ce moment décisif des géantes rouges en fait des «chandelles standard» idéales pour évaluer les distances cosmiques, car la luminosité est indépendante de la masse de l'étoile. La cosmologiste a mis son idée en application, et tandis que nous descendions du car, je lui ai demandé quand aurait lieu sa conférence. «C'est la seconde après le déjeuner, demain», m'a-t-elle répondu. «Soyez là», a insisté Barry Madore, avec un regard pétillant...

QUAND L'UNIVERS SE JOUE DE NOUS

De retour dans ma chambre d'hôtel, un coup d'œil sur les réseaux sociaux me montra que tout avait changé. Les travaux du CCHP venaient d'être publiés. Grâce au TRGB, ils avaient fixé la constante de Hubble à 69,8... soit une valeur nettement inférieure à celle (74,0) de l'équipe SH0ES, obtenue en utilisant des céphéides, et à celle (73,3) de H0LiCOW, à partir des quasars, mais supérieure à celle (67,4) calculée par l'équipe Planck. «En fait, l'Univers se joue de nous, n'est-ce pas?» a tweeté un astrophysicien.

Dan Scolnic, un jeune membre à lunettes de l'équipe SH0ES basé à l'Université Duke, en Caroline du Nord, s'est réuni avec Adam Riess et deux autres membres de l'équipe pour «essayer de comprendre ce que contenait l'article. Adam et moi sommes ensuite allés dîner dans un état de perplexité certain, car jusqu'à présent, les céphéides et le TRGB s'accordaient plutôt bien.»

Le changement clé apporté par Wendy Freedman fut vite identifié : il s'agissait d'une nouvelle façon d'estimer les effets de la poussière cosmique lors de la mesure de la luminosité intrinsèque des géantes rouges. «Nous avons une quantité de questions à propos de

➤ cette nouvelle méthode», explique Dan Scolnic. Comme d'autres participants disséminés dans l'hôtel, ils attendaient avec impatience la conférence de Wendy Freedman du lendemain.

POUR UNE BONNE ÉCHELLE DE DISTANCE...

Tension, problème, crise... – l'atmosphère autour de la constante de Hubble est passablement agitée depuis quatre-vingt-dix ans, depuis que l'astronome américain Edwin Hubble a démontré que l'espace et tout ce qu'il contient s'éloigne de nous (Hubble lui-même refusa d'accepter sa propre conclusion). L'expansion cosmique, l'une des plus grandes découvertes cosmologiques de tous les temps, implique que l'Univers a un âge fini.

Le rapport entre la vitesse de récession d'un objet et sa distance nous donne la constante de Hubble. Cependant, s'il est simple grâce à l'effet Doppler de déterminer à quelle vitesse une étoile ou une galaxie s'éloigne, il est bien plus difficile de déterminer la distance à laquelle se situe une lueur de la taille d'une tête d'épingle dans le ciel nocturne.

On doit à Henrietta Leavitt, de l'observatoire de l'université Harvard, la découverte en 1908 d'une caractéristique essentielle des céphéides: la fréquence de leurs oscillations est proportionnelle à leur luminosité. En d'autres termes, les céphéides grandes et lumineuses varient plus lentement que leurs équivalentes petites et plus ternes. Ainsi, à partir des pulsations d'une céphéide lointaine, on peut déduire sa luminosité intrinsèque. En comparant cette dernière à la faiblesse de l'éclat de l'étoile tel que nous le percevons, on détermine sa distance, et par extension celle de la galaxie dans laquelle elle se trouve.

Dans les années 1920, Edwin Hubble a utilisé des céphéides et la loi de Leavitt pour déduire qu'Andromède et d'autres nébuleuses spirales sont en fait des galaxies distinctes, situées bien au-delà de notre Voie lactée. L'Univers ne se résumait plus à notre seule galaxie! Edwin Hubble a ensuite utilisé les céphéides pour estimer les distances des galaxies voisines qui, mises relation avec leurs vitesses, ont révélé le phénomène d'expansion cosmique.

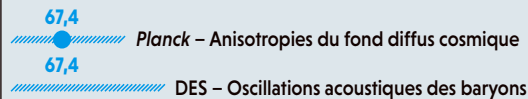
La valeur calculée par Hubble était de... 500 kilomètres par seconde par mégaparsec. Elle a diminué à mesure que les cosmologistes utilisaient les céphéides pour calibrer des échelles de distance cosmique de plus en plus précises. Dans les années 1970, Allan Sandage, le protégé d'Edwin Hubble, a proposé une valeur de H_0 avoisinant 50. Ses rivaux avançaient le double, à partir d'observations astronomiques différentes. Le débat virulent opposant les deux camps faisait rage au début des années 1980 quand Wendy Freedman, alors jeune postdoctorante canadienne aux observatoires Carnegie, à Pasadena, en Californie, où exerçait également Allan Sandage, a commencé à améliorer les échelles de distance cosmique.

Pour élaborer un tel balisage de l'Univers, la première opération consiste à calibrer la distance d'étoiles dont la luminosité est connue, comme les céphéides. Grâce à ces «chandelles standard», on évalue les distances de céphéides plus ternes situées dans des galaxies plus lointaines. On accède alors aux distances des «supernovæ de type Ia» de ces mêmes galaxies, ces explosions stellaires prévisibles étant des chandelles standard plus lumineuses, mais plus rares. De là, on mesure les distances de centaines de supernovæ plus

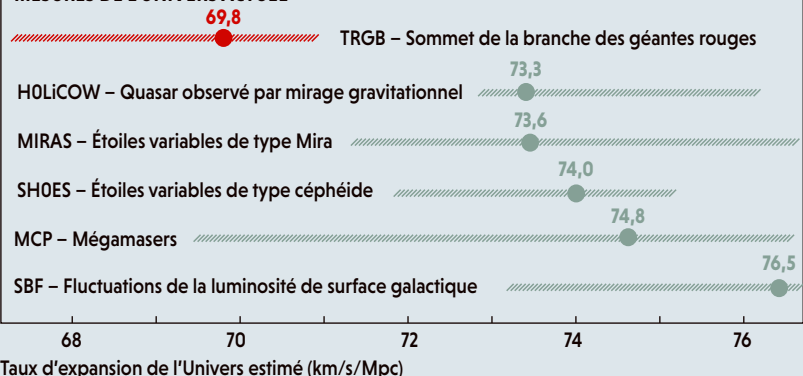
LA CONTROVERSE DE LA CONSTANTE

Le taux d'expansion actuel de l'Univers, c'est-à-dire la constante de Hubble (H_0), dépend des lois et des ingrédients fondamentaux de l'Univers. Mais lorsque les cosmologistes calculent sa valeur à partir de données issues de l'Univers primordial, ils obtiennent des valeurs (en bleu) bien inférieures à celles (en gris) déterminées par l'observation d'objets lointains actuels. Qui plus est, une nouvelle mesure livre une valeur intermédiaire (en rouge), compliquant encore davantage le débat.

MESURES DE L'UNIVERS PRIMORDIAL



MESURES DE L'UNIVERS ACTUEL



lointaines, situées dans des galaxies qui se déplacent librement dans le flux de Hubble, c'est-à-dire le courant de l'expansion cosmique. Le rapport entre la vitesse et la distance de ces supernovæ fournit H_0 . Cependant, l'aspect terne d'une chandelle standard n'est pas nécessairement dû à l'éloignement de l'astre. La poussière cosmique peut aussi être en cause, faisant paraître des étoiles plus lointaines qu'elles ne le sont vraiment.

À l'inverse, la proximité d'autres étoiles peut rendre artificiellement des supernovæ plus lumineuses, et donc plus proches. De plus, même les chandelles standard connaissent des variations inhérentes dues à leur âge ou à leur métallicité (leur contenu en atomes plus lourds que l'hélium), lesquelles doivent être corrigées. Wendy Freedman a mis au point de nouvelles méthodes pour prendre en compte de nombreuses sources d'erreurs systématiques. Ses premières valeurs de H_0 , supérieures à celles d'Allan Sandage, ont fortement déplu à son aîné. « Pour lui, je n'étais qu'une jeune parvenue, » s'est-elle confiée en 2017.

JUSQU'À SON DERNIER JOUR...

Malgré cela, elle a assemblé et dirigé, dans les années 1990, le *Hubble Space Telescope Key Project*, un nouveau projet de mesure des distances des céphéides et des supernovæ avec une plus grande précision. La valeur de H_0 égale à 72 (avec une marge d'erreur de 10%), qu'elle et son équipe ont publiée en 2001, a coupé la poire en deux dans le débat de 50 contre 100.

Deux ans plus tard, Wendy Freedman était nommée directrice des observatoires Carnegie, devenant ainsi la supérieure hiérarchique d'Allan Sandage. Elle a fait preuve d'élégance et il s'est adouci. Mais « jusqu'à son dernier jour en 2010, précise-t-elle, il est demeuré partisan d'une valeur faible de la constante de Hubble. »

Quelques années après le 72 de Wendy Freedman, Adam Riess, professeur à l'université Johns-Hopkins, est entré dans la course aux échelles de distance cosmique. Son projet : déterminer la valeur de H_0 avec une marge de seulement 1%, dans l'espoir de mieux comprendre l'énergie noire qu'il avait codécouverte. Depuis, son équipe a régulièrement resserré les barreaux de l'échelle, en particulier le premier et le plus important : l'échelon de calibration. Comme le formule Adam Riess : « À quelle distance se trouvent toutes choses ? Une fois cette question résolue, la vie devient plus simple ; vous mesurez des choses relatives. » Son équipe utilise actuellement cinq façons indépendantes de mesurer les distances de leurs céphéides étalons. « Elles s'accordent toutes plutôt bien, ce qui nous met en confiance », explique-t-il. À mesure qu'ils collectaient des données et amélioraient leurs analyses, la marge d'erreur autour de H_0

s'est réduite à 5% en 2009, puis 3,3%, 2,4% et enfin 1,9% en mars 2019.

Pendant ce temps, depuis 2013, avec des versions de plus en plus précises du fond diffus cosmologique, la collaboration Planck améliore sa valeur de H_0 . Dans sa dernière publication, en 2018, elle avance une valeur de la constante égale à 67,4 avec une marge d'erreur de 1%. Des mesures indépendantes devenaient urgentes.

Tommaso Treu, l'un des fondateurs de l'équipe H0LiCOW et professeur à l'université de Californie, à Los Angeles, rêvait depuis l'époque où il étudiait à Pise de mesurer la constante de Hubble en utilisant la méthode de *time-delay cosmography*, une méthode sans échelle de distance cosmique. À la place, elle détermine directement la distance des quasars – des galaxies lointaines et très énergétiques aux noyaux particulièrement brillants – en mesurant minutieusement le délai entre les différentes images d'un quasar (on parle de fantômes) qui se forment par des effets de lentille gravitationnelle.

Tandis que Tommaso Treu et ses collègues collectaient des données sur les quasars, Wendy Freedman et son équipe se tournaient vers le sommet de la branche des géantes rouges. Alors que les céphéides sont jeunes et nichées dans les centres poussiéreux et encombrés du centre des galaxies, les géantes rouges sont vieilles et résident plutôt dans les bordures extérieures plus clairsemées des galaxies. En utilisant le télescope spatial *Hubble*, le CCHP est parvenu à étendre leur échelle de distance aux supernovæ du flux de Hubble et à mesurer H_0 . « À un certain niveau, on se dit : "Bon, je vais tomber d'un côté, ou de l'autre, du débat ?" » m'a confié Wendy Freedman. « Mais finalement, avec notre 69,8, nous avons atterri au milieu, et c'est une situation intéressante ! »

COINCÉ AU MILIEU

Mon voisin dans le car, le matin suivant la publication de Wendy Freedman, était Francis-Yan Cyr-Racine, théoricien à l'université du Nouveau Mexique. Plus tôt en 2019, avec Lisa Randall, de l'université Harvard, et d'autres, il a proposé une solution inédite au problème de la constante de Hubble. Leur idée – un nouveau champ d'énergie répulsive de courte durée dans l'Univers primordial – accélérerait l'expansion cosmique, ce qui ferait correspondre les prédictions et les observations. La communauté des experts estime cette solution, et bien d'autres encore, comme relativement artificielles.

Lorsque j'ai mentionné la publication de Wendy Freedman, Francis-Yan Cyr-Racine n'a pas semblé surpris. « La bonne valeur est probablement 70 », m'a-t-il dit, signifiant que les estimations basées sur l'Univers primordial et

>

- les observations actuelles vont probablement finir par converger au milieu, et que le modèle Λ CDM sera validé (il a plus tard précisé qu'il plaisait à moitié).

Dans la salle du séminaire, Barry Madore s'est assis près de moi et d'un autre journaliste et nous a demandé: «Alors, de quel côté va pencher la balance?» Vers le milieu, semblerait-il. «Vous connaissez cette chanson, "Stuck in the middle with you"?» a-t-il demandé. «On y entend "Des clowns à ma gauche, des plaisantins à ma droite. Et me voici, coincé au milieu avec vous."»

LA CONSTANTE IVRE

Juste avant le déjeuner, nouveau rebondissement. Mark Reid, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique a présenté ses récentes mesures de masers (des effets proches du laser dans les galaxies) à partir desquelles il a obtenu une valeur de H_0 égale à 74,8, plus ou moins 3,1. Adam Riess a photographié la présentation. Dan Scolnic s'est quant à lui exprimé lors d'un tweet: «C'en est trop pour cette semaine. Rentre chez toi, H_0 , tu es ivre.»

À la pause de midi, Adam Riess semblait dépassé par toutes ces nouvelles mesures. Pendant plusieurs années, son équipe et lui sortaient du lot en s'écartant de la valeur de la constante de Hubble fixée par l'équipe Planck. «À cette époque, il y avait une tension et une divergence, et nous avons essuyé des coups durs», a-t-il confié. Mais en deux semaines, son isolement n'était plus qu'un souvenir, puisque trois nouvelles valeurs venaient semer la zizanie. Selon lui «la tension grandit, car personne ne propose de valeur inférieure à celle de Planck. Pourquoi aucune équipe n'a trouvé une valeur de 62 ou de 65?».

Quant à cette fameuse valeur de 69,8 du CCHP, Adam Riess avait quelques questions concernant la méthode de Wendy Freedman pour calibrer le premier barreau de son échelle de distance avec le TRGB dans le Grand Nuage de Magellan. «Le Grand Nuage de Magellan n'est pas une galaxie, c'est un nuage poussiéreux et amorphe, explique-t-il. C'est là toute l'ironie. Ils ont choisi d'utiliser le TRGB pour échapper au problème de la poussière,» mais ils doivent bien les calibrer quelque part – «autrement dit, ils doivent choisir des géantes rouges dont on connaît la distance par quelque autre méthode. Et le seul endroit où ils ont fait ça, c'est dans le Grand Nuage de Magellan.»

Une heure plus tard, Wendy Freedman, l'air serein, a présenté son argumentaire. «Si nous plaçons tous nos œufs dans le panier des céphéides, nous ne découvrirons jamais les inconnues inconnues», a-t-elle commenté.

Elle a alors expliqué qu'elle et ses collègues ont utilisé les géantes rouges du Grand Nuage de Magellan comme étalon parce que la distance du nuage a été mesurée avec une précision extrême

par diverses méthodes. Par ailleurs, ils ont employé une nouvelle approche pour corriger l'effet de la poussière sur la luminosité, une approche qui a recours aux étoiles elles-mêmes, en exploitant leurs changements de luminosité en fonction de la couleur. Elle a ainsi remarqué que ses paires de géantes rouges et de supernovæ, sur le second barreau de son échelle de distance, faisaient montre de moins de variations que les paires de céphéides et de supernovæ d'Adam Riess, suggérant ainsi que sa mesure de la poussière était potentiellement plus précise.

**Des clowns
à ma gauche,
des plaisantins
à ma droite.
Et me voici
coincé au milieu**

Durant la discussion, Wendy Freedman a également souligné que de meilleures mesures étaient encore nécessaires pour écarter de potentielles erreurs systématiques. «Je pense que nous en sommes à ce stade que, a-t-elle précisé.»

De là, la discussion s'est changée en joute verbale entre Wendy Freedman et Adam Riess. «Wendy, pour répondre à votre question, a lancé Adam Riess alors qu'aucune question n'avait été posée, il y a eu cinq résultats indépendants présentés jusqu'à maintenant. Ce rêve d'enfin y parvenir... est justement en train de se produire.»

LA PIÈCE OÙ TOUT SE JOUE

Dan Scolnic, le collaborateur d'Adam Riess et membre de l'équipe SH0ES, m'a proposé de le rejoindre dehors. Nous nous sommes assis au Soleil. «Voilà une journée comme je n'en avais jamais connu», m'a-t-il confié.

Avec l'arrivée du TRGB de Wendy Freedman et des masers de Mark Reid, les résultats pourtant récents de HOLICOW lui paraissaient déjà anciens. «Cela fait trois nouvelles fracassantes en une seule semaine. Et je ne sais pas vraiment sur quel pied nous dansons, à présent.» Même si la divergence est réelle, «il n'existe pas de bonne version capable de tout expliquer, ni du côté théorique, ni du côté des observations. C'est ce

qui rend l'ensemble si déroutant. C'est comme dans la chanson de la comédie musicale *Hamilton*, a-t-il poursuivi avant de réciter les paroles: "C'est dans cette pièce que tout se joue", en ce moment même. » Wendy Freedman est alors apparue. « Hey, Wendy, l'a interpellée Dan. Je disais à l'instant: n'a-t-on pas la sensation qu'il s'agit là de "la pièce où tout se joue"? En tant qu'enfant, n'aurais-tu pas voulu être dans cette pièce? »

UN PSYCHODRAME POUR PAS GRAND CHOSE

« N'est-ce pas là que nous voulons être aujourd'hui? a-t-elle répondu. Nous travaillons sur des données extraordinaires, qui nous apprennent comment l'Univers évolue. » Et Dan Scolnic de rajouter: « Et les nombres sont très proches; nous débattons de quelques points de pourcentage seulement. Quand on considère tout le psychodrame déclenché, c'est amusant qu'il ne soit question que de 3 kilomètres par seconde par mégaparsec. »

« Vous avez la bonne attitude », a acquiescé Wendy Freedman. Alors que l'heure du dîner approchait, tous les deux sont partis trouver un moyen de regagner le bâtiment, dont les portes étaient fermées à cette heure de la soirée.

Le troisième jour est venu avec deux nouvelles mesures de la constante de Hubble: une échelle de distance cosmique étalonnée à partir d'étoiles variables (dites de « type Mira ») comme les céphéides, a donné une valeur de 73,6, et les fluctuations de luminosité de surface galactique 76,5, plus ou moins 4 pour les deux. Adam Riess a encore pris des photographies et, à la fin de la journée, un graphique reprenant toutes les mesures existantes avait été établi (voir l'encadré page 80).

Les deux prédictions faites à partir de l'Univers primordial couvraient la partie gauche du graphique, avec des barres d'erreurs serrées autour de 67,4. Et cinq mesures de l'Univers actuel occupaient la partie droite, gravitant autour de 73 et 74. Puis, au milieu, se trouvait la mesure de Wendy Freedman, égale à 69,8, un véritable bâton dans les roues des autres équipes, la douloureuse suggestion conciliatrice selon laquelle toutes les mesures pourraient, *in fine*, se rejoindre, nous laissant face aux mystères du modèle Λ CDM, sans rien de neuf à dire sur la nature. Cela étant, toutes les mesures de H_0 de l'Univers actuel, même celle de Wendy Freedman, sont supérieures à 67,4. Or, des mesures erronées auraient dû tomber tant en dessous qu'au-dessus de cette barre. La divergence est-elle réelle...

Dernier intervenant, Francis-Yan Cyr-Racine, a réalisé un sondage pour déterminer comment nommer cette contradiction. La plupart des participants ont voté pour les termes « tension » et « problème ». Graeme Addison, expert en oscillations acoustiques des baryons,

a dit dans un courriel après la conférence: « Mon impression est que la divergence de Hubble est un véritable problème, et qu'il nous manque des éléments physiques importants, quelque part. Mais les solutions proposées jusqu'à maintenant ne sont pas très convaincantes. »

En revanche, pour Graeme Addison, la cohérence des résultats des équipes H0LiCOW et SH0ES est particulièrement convaincante. Et, bien que l'article de Wendy Freedman suggère que « les incertitudes associées aux céphéides de l'équipe SH0ES ont été sous-estimées », il pense que des questions se posent aussi sur la calibration des géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan. Wendy Freedman estime avoir amélioré la mesure de la poussière, mais Adam Riess et ses collègues le contestent.

Le lundi 5 août 2019, dans un article publié sur arxiv.org, Adam Riess et ses collaborateurs prétendent que la calibration de Wendy Freedman repose sur les données télescopiques à faible résolution. Selon eux, en remplaçant ces données par d'autres de meilleure résolution, la valeur estimée de H_0 augmenterait de 69,8 à 72,4, et serait alors compatible (dans la marge d'erreur) avec les mesures de H0LiCOW, de SH0ES et des autres équipes. « Il semble y avoir de sérieux défauts dans leurs interprétations de notre méthode de calibration », a répondu Wendy Freedman. Avec ses collègues, elle a refait son analyse en utilisant les données plus récentes et, précise-t-elle dans un courriel, « nous ne trouvons pas le résultat revendiqué par Adam Riess et ses coauteurs. »

DE NOUVELLES CHANDELLES

Si les quatre nouvelles mesures de H_0 à droite du graphique n'effacent pas la valeur de Wendy Freedman dans l'esprit de plusieurs astrophysiciens, c'est en partie à cause de son humeur égale en toutes circonstances. Et, surtout, « elle est particulièrement bien respectée, et a la réputation d'effectuer un travail méticuleux et approfondi », estime Daniel Holz, un astrophysicien de Chicago qui utilise les collisions d'étoiles à neutrons comme des « chandelles standard », une nouvelle technique prometteuse pour mesurer H_0 .

D'ici à deux ou trois ans, le télescope spatial *Gaia* devrait fournir de nouvelles données permettant de mieux calibrer les céphéides et les géantes rouges, géométriquement cette fois, en fonction de leur parallaxe, c'est-à-dire de la distance les séparant selon différents points d'observation dans le ciel. Le télescope spatial *James-Webb*, le successeur de *Hubble*, fournira également de nouvelles données plus fiables lorsqu'il sera lancé en 2021. Les cosmologistes connaîtront la valeur exacte de H_0 probablement au cours des dix prochaines années. Ils pourront alors résoudre la *tension*, le *problème* ou la *crise*. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. CHEN ET AL., A SHARP view of H0LiCOW: H_0 from three time-delay gravitational lens systems with adaptive optics imaging, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 490(2), pp. 1743-1773, 2019.

W. 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, *The Astrophysical Journal*, vol. 882(1), 2019.

P. AGRAWAL ET AL., Rock'n' Roll Solutions to the Hubble tension, arxiv.org/abs/1904.01016

A. 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, *The Astrophysical Journal*, vol. 876(1), 2019.

Planck Collaboration, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, arxiv.org/abs/1807.06209

À la poursuite de l'énergie sombre

Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, les physiciens invoquent une énergie sombre répulsive. Les scientifiques espèrent en savoir plus en sondant les confins du cosmos.



Le télescope *Mayall*, installé sur le pic Kitt, en Arizona, accueille l'instrument DESI dédié à l'observation des galaxies et des quasars afin de mieux comprendre l'énergie sombre.

L'ESSENTIEL

- L'expansion de l'Univers accélère, et on ignore pourquoi. L'une des hypothèses est l'existence d'une «énergie sombre».

- Plusieurs projets, comme DES, DESI et bientôt LSST et *Euclid*, visent à résoudre ce mystère en étudiant l'histoire de l'expansion cosmique.

- En en connaissant les détails fins, on pourra contraindre les différents modèles d'énergie sombre, voire en éliminer certains.

L'AUTEUR



JOSHUA FRIEMAN est cosmologiste, directeur de recherche au Fermilab, aux États-Unis, professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'institut Kavli de physique cosmologique, à l'université de Chicago et directeur du programme DES.

I

ly a près d'un siècle, Edwin Hubble a découvert que l'Univers est en expansion: presque toutes les galaxies s'éloignent de la Voie lactée, et plus elles sont distantes, plus elles s'éloignent vite. Cette découverte fondamentale a été suivie en 1998 d'une autre, encore plus surprenante: cette expansion est de plus en plus rapide. Mais pourquoi donc accélère-t-elle? C'est l'une des plus grandes énigmes de la science moderne.

Pour expliquer l'accélération cosmique, les cosmologistes ont proposé deux solutions. La première est qu'Albert Einstein n'avait pas eu le dernier mot sur la gravitation: bien que la gravité ait un effet attractif sur Terre et dans le Système solaire, peut-être agit-elle différemment, à grande échelle, devenant une force répulsive quand les distances en jeu deviennent gigantesques. Dès lors, il faudrait modifier la théorie de la gravitation pour les échelles cosmiques (voir l'entretien avec B. Famaey, page 46).

La seconde idée est que l'Univers est empli de quelque chose d'invisible, une «énergie sombre», qui contre la force de gravité et prend le dessus aux plus grandes échelles. Des mesures cosmiques indiquent que l'énergie sombre, si elle existe, constituerait aujourd'hui 70% de la masse de

l'Univers (voir *Repères*, page 6). Le reste de la masse de l'Univers est partagé entre 25% de matière noire et 5% de matière ordinaire (celle des étoiles, des planètes, de vous...).

L'hypothèse de l'énergie sombre a reçu davantage d'attention que l'idée d'une gravité modifiée aux grandes échelles parce qu'elle explique mieux la formation des galaxies et des grandes structures de l'Univers et parce qu'elle est compatible avec toutes les mesures dont nous disposons.

Mais comment peut-on savoir avec certitude si l'énergie sombre est responsable de l'accélération cosmique? Et si c'est bien l'énergie sombre, quelle en est exactement la nature? Pour répondre à ces questions, avec quelque 300 autres physiciens et astronomes des États-Unis, d'Espagne, du Royaume-Uni, du Brésil, d'Allemagne et de Suisse, nous avons lancé il y a quelques années le projet d'observation astronomique DES (pour *Dark energy survey*, soit «relevé de l'énergie sombre»). D'autres projets affichant le même objectif ont été depuis initiés (voir l'encadré page 90).

UNE MÉGARÉSOLUTION

Grâce à ce relevé, nous espérons reconstruire l'évolution de l'expansion cosmique au cours des quelque 14 milliards d'années de l'histoire de l'Univers. Et nous pourrions étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomerats de galaxies qui occupent l'Univers) afin de, peut-être, trancher entre les différentes hypothèses quant à l'expansion de l'Univers.

La collaboration DES a construit la *Dark Energy Camera*, le cœur du projet, et nous l'avons installé sur le télescope de quatre mètres *Victor Blanco* à l'Observatoire interaméricain du Cerro Tololo, installé sur les hauteurs des Andes chiliennes.

La caméra est conçue pour étudier avec rapidité de nombreux objets: des galaxies, des amas de galaxies et des supernovæ. Grâce à