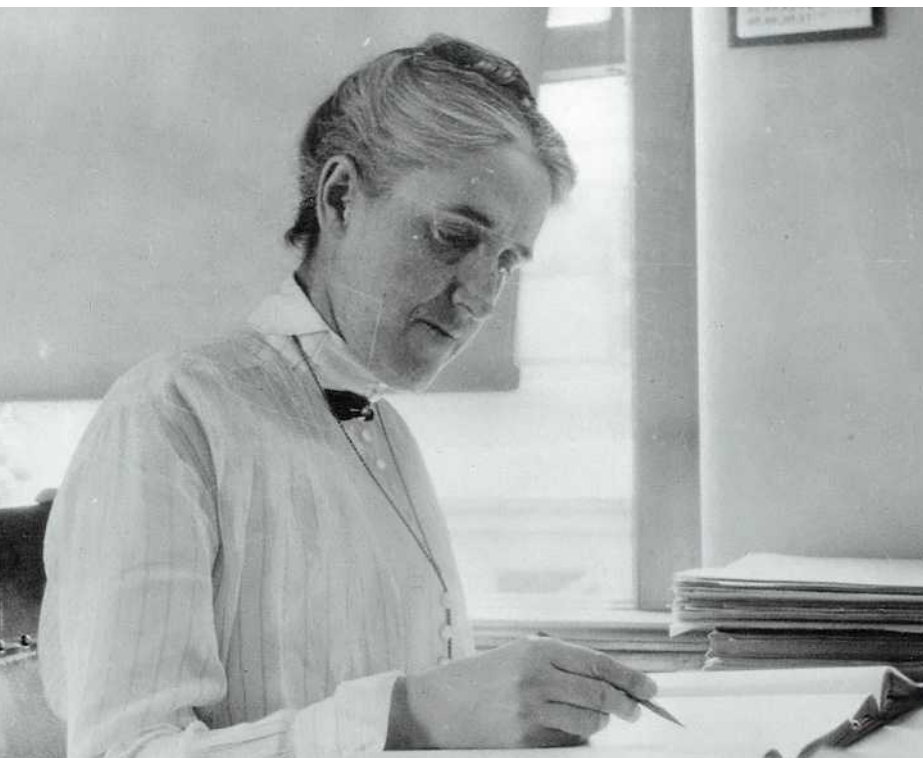




Henrietta Swan Leavitt à son bureau de l'observatoire de l'université Harvard. Elle a découvert comment les étoiles céphéides, à la luminosité oscillante, pouvaient aider à déterminer la vitesse d'expansion de l'Univers.

«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 avions 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

67,4

Planck – Anisotropies du fond diffus cosmique

67,4

DES – Oscillations acoustiques des baryons

MESURES DE L'UNIVERS ACTUEL

69,8

TRGB – Sommet de la branche des géantes rouges

HOLICOW – Quasar observé par mirage gravitationnel

73,3

MIRAS – Étoiles variables de type Mira

73,6

SHOES – Étoiles variables de type céphéide

74,0

MCP – Mégamasers

74,8

SBF – Fluctuations de la luminosité de surface galactique

76,5

Taux d'expansion de l'Univers estimé (km/s/Mpc)

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

>