

minutes après le Big Bang la température de l'Univers est descendue en dessous de quelques milliards de degrés, protons et neutrons ont pu se combiner pour former des noyaux d'hélium, dont l'abondance dépend directement de la dynamique de l'expansion, elle-même dictée, *via* les lois de la gravitation, par l'abondance des espèces présentes, donc, entre autres, celles des neutrinos cosmologiques. Leur existence, et leur abondance précise ne font donc guère de doute.

Mais toutes les propriétés des neutrinos, notamment leur masse éventuelle, sont mal connues, en raison de leurs très faibles interactions avec la matière. À la fin des années 1990 fut découverte l'oscillation des neutrinos, c'est-à-dire le fait qu'un neutrino d'un certain type (il en existe trois) peut se transformer en un neutrino d'un autre type. Or ce phénomène n'est possible que si les neutrinos ont une masse. En conséquence, les neutrinos constituent une forme de matière «noire», c'est-à-dire, sans interaction notable avec la matière autrement que *via* la force de gravitation. Dans les années 1990, à partir des travaux de James Peebles récemment nobélisé pour l'ensemble de son œuvre, on comprit que les neutrinos ne pouvaient constituer le gros de cette matière noire. En effet, leur masse est si faible qu'ils se comportent pendant des milliers d'années comme des particules de masse nulle et se déplacent

BIBLIOGRAPHIE

M. AKER ET AL., An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN, *Phys. Rev. Letter*, à paraître, 2019. arxiv.org/abs/1909.06048

alors à une vitesse proche de celle de la lumière. Dès lors, cela retarde de beaucoup leur capacité à amorcer la formation de structures dans l'Univers: par le passé, peu après le Big Bang, une concentration locale de neutrinos cosmologiques ne pouvait durer, car ils s'échappaient bien avant que le champ de gravité exercé par l'«amas» n'attire à lui des quantités notables de matière. Les neutrinos constituent ainsi un exemple de matière noire dite «chaude»: pendant longtemps, leur vitesse élevée leur a interdit de participer à la formation des grandes structures. À l'inverse, de nos jours, au moins deux des trois types de neutrinos ont une vitesse faible, et participent à la formation des grandes structures de l'Univers.

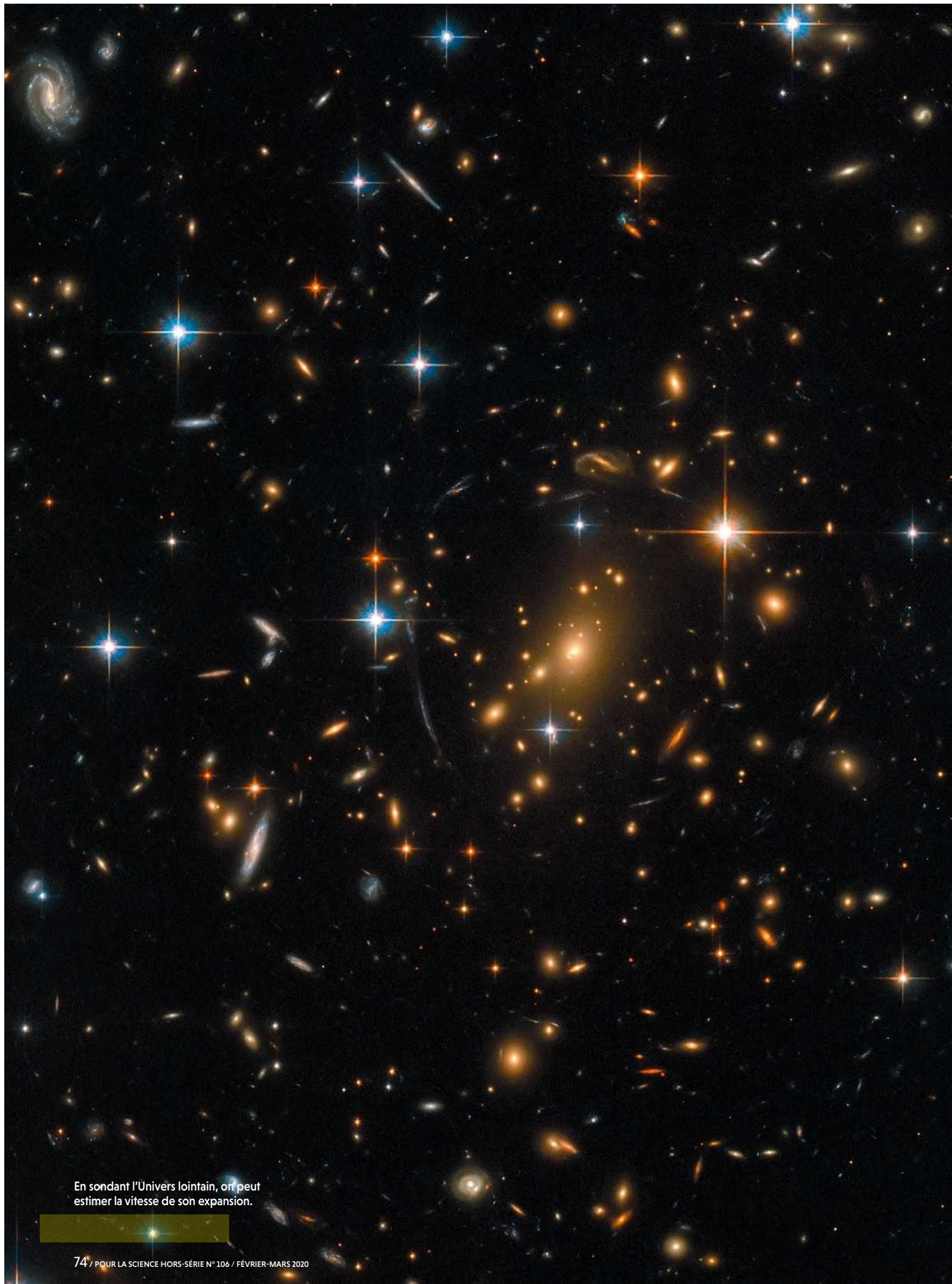
LA BORNE DE KATRIN

Les neutrinos ne forment donc qu'une partie relativement modeste de la matière noire. Peut-on l'estimer? Les oscillations des neutrinos indiquent que la masse des trois types est au moins supérieure à 0,057 électronvolt (eV), ce qui leur confère une contribution d'au moins 0,13% dans le budget énergétique total de l'Univers (là où la matière ordinaire compte pour environ 4% et la matière noire 25%, l'énergie sombre correspondant au reste). On peut aussi en fixer une limite supérieure: la somme des masses des trois neutrinos doit être assez inférieure à 10 eV sans quoi il n'y aurait pas assez de l'autre matière noire, dite «froide» pour former les galaxies et amas de galaxies observés. Une étude plus fine de la formation des grandes structures limite même leur masse à 0,3 eV, un chiffre en accord avec les résultats récents de l'expérience *Katrin*, qui a fixé de façon directe une limite supérieure à la masse de l'antineutrino électronique à 1,1 eV, soit $1,96 \times 10^{-33}$ gramme.

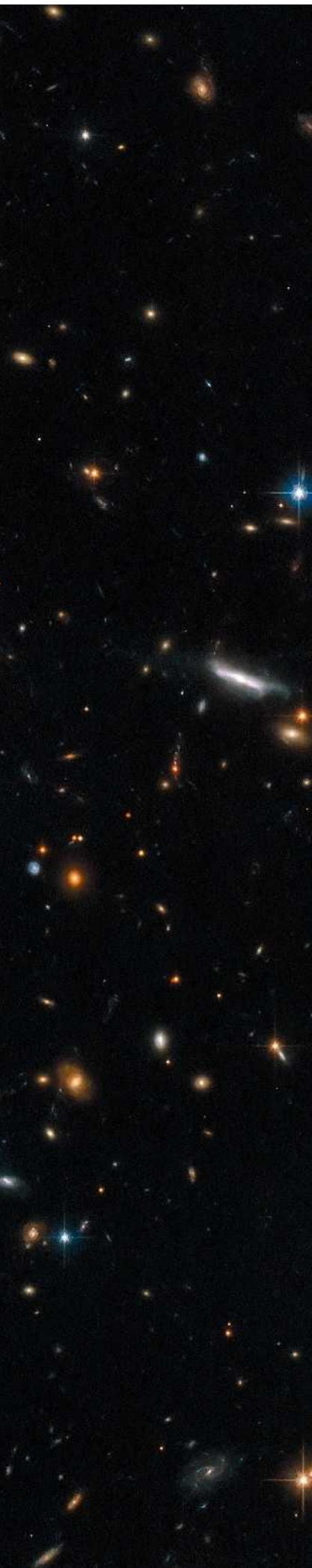
L'influence des neutrinos cosmologiques sur la formation des grandes structures étant faible, voire négligeable, on pourrait penser qu'ils ne méritent guère d'attention. On peut néanmoins en tirer deux leçons importantes. D'abord, rien ne garantit que la matière noire restante soit d'une seule forme: identifier l'une d'elles ne marquera peut-être pas la fin de l'histoire. Pire: même quand les neutrinos sont dotés d'une énergie importante (c'est le cas des «neutrinos solaires» produits par notre étoile), ils interagissent vraiment très peu avec la matière. Ces interactions baissent avec l'énergie. Or les neutrinos issus du Big Bang ont une énergie des millions de fois inférieure à celle des neutrinos solaires. Leur détection directe semble soudain hors de portée des rêves les plus fous des physiciens. Conclusion, le cosmos contient des particules qui nous échapperont peut-être à jamais. En d'autres termes, la quête d'une matière noire n'a aucune garantie d'aboutir. Un scénario cauchemardesque! ■

L'expérience *Katrin*, installée à Karlsruhe, en Allemagne (ici, en cours d'acheminement) consiste en une «balance» de 200 tonnes: elle a révélé que le neutrino ne pèse pas plus de $1,96 \times 10^{-33}$ gramme.





En sondant l'Univers lointain, on peut
estimer la vitesse de son expansion.



LES SOUBRESAITS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

Depuis le début du xx^e siècle, on sait que l'Univers est en expansion, ce qui est conforme à la relativité générale. Mais en 1998, les astrophysiciens ont découvert que cette expansion accélère. Pour expliquer ce phénomène, ils ont invoqué une mystérieuse énergie sombre répulsive. De quoi est-elle constituée ? Pour répondre, il est nécessaire de bien cartographier l'Univers, un défi auquel s'attellent de nombreux projets. Mais les premiers résultats ne font pas consensus...

Cependant, a-t-on vraiment besoin de cette énergie sombre ? La constante cosmologique, introduite puis reniée par Albert Einstein, ne suffirait-elle pas à expliquer cette accélération ? Ou bien – pour à l'inverse s'affranchir de l'héritage du grand physicien –, ne serait-il pas temps de modifier la théorie de la gravitation ?

LES SOUBRESAITS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

L'ESSENTIEL

- Depuis la découverte de l'énergie sombre en 1998, on cherche à connaître la vitesse de l'expansion de l'Univers.
- Les méthodes sont diverses, de plus en plus nombreuses et les mesures se succèdent, mais sans parvenir à un accord.
- Un fossé sépare les méthodes fondées sur l'Univers primordial et sur celui que l'on observe aujourd'hui.
- Et c'est tout le modèle standard de la cosmologie qui pourrait être remis en cause.

L'AUTRICE

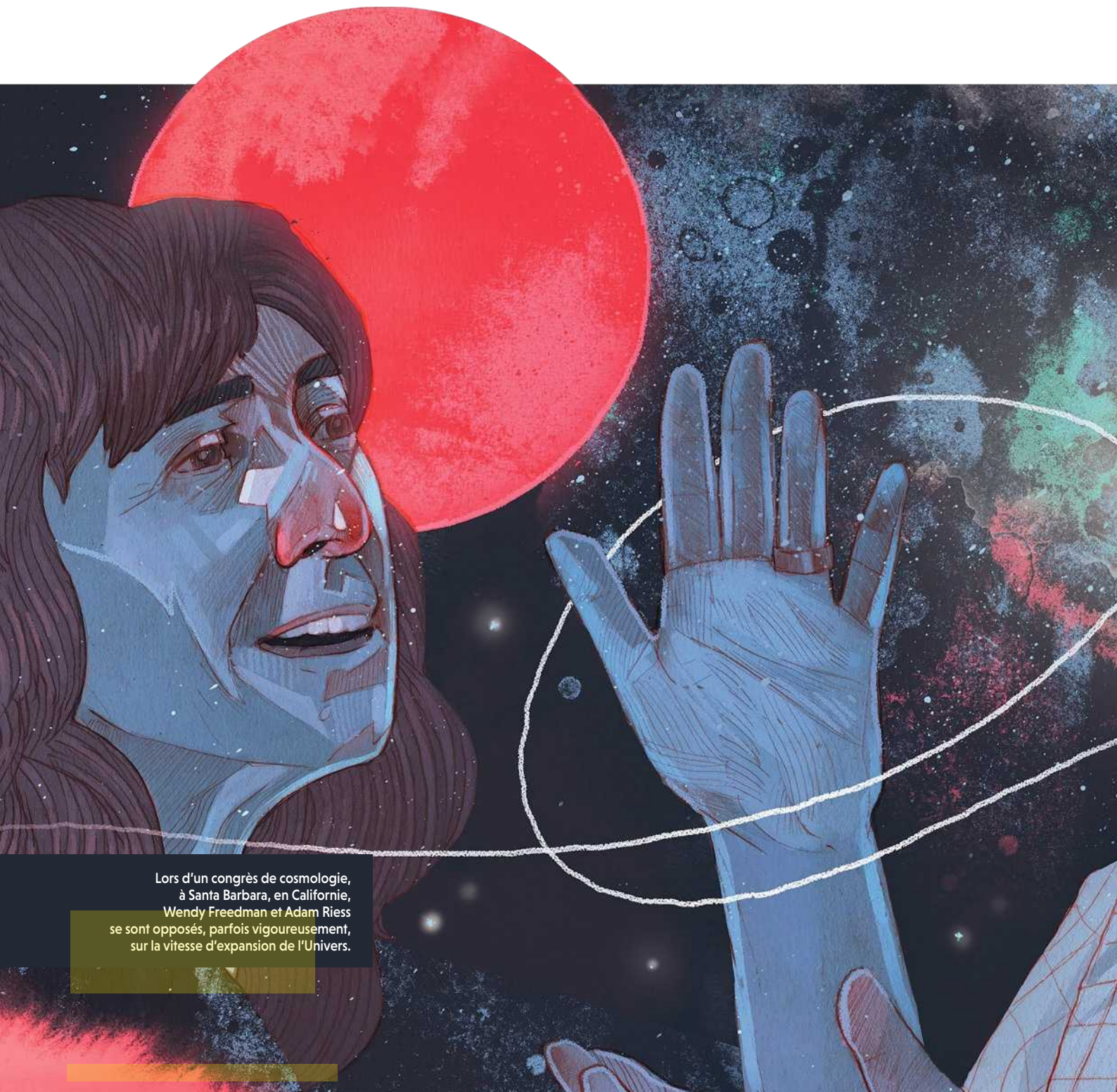


NATALIE WOLCHOVER
diplômée en physique
de l'université Tufts
et journaliste
au magazine Quanta



Quanta
magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par *Quanta Magazine*, une publication en ligne indépendante soutenue par la Simons Foundation afin de favoriser la diffusion des sciences: <http://bit.ly/QM-Cosmo-Dbt>



Lors d'un congrès de cosmologie, à Santa Barbara, en Californie, Wendy Freedman et Adam Riess se sont opposés, parfois vigoureusement, sur la vitesse d'expansion de l'Univers.

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 :