

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.

