

Tels les navigateurs de l'Antiquité découvrant que la Terre est ronde, notre génération s'aperçoit que le monde n'est pas une simple extrapolation de l'image familière que nous en donne notre voisinage. À l'échelle cosmique, l'Univers est dominé par une substance étrange et invisible. Ce que nous voyons, les étoiles, les nuages de gaz et de poussières et toute la matière ordinaire représentent moins de cinq pour cent de sa masse totale : étoiles et galaxies ne sont que des débris ballottés par les flots d'une mer invisible. Nous savons très peu de choses sur ce mystérieux océan. De surcroît, il y a quatre ans, on a découvert que cette nouvelle substance ne constitue qu'un tiers de la masse totale du cosmos, les deux autres tiers étant faits d'une nouvelle forme d'énergie. Les termes que nous employons pour désigner ces deux constituants principaux de l'Univers, la matière noire et l'énergie sombre, reflètent hélas notre ignorance de leur nature exacte.

Depuis 70 ans, les astronomes accumulent des preuves de l'existence de la matière noire, notamment en analysant le mouvement des étoiles dans les galaxies spirales ou celui des galaxies dans les amas et les superamas. Cependant, ces preuves sont indirectes et ne permettent pas de rejeter définitivement les autres hypothèses, telles que la modification des lois de la physique aux échelles cosmiques, par exemple. Par ailleurs, les observations ne nous renseignent pas beaucoup sur les propriétés de l'hypothétique matière noire. Tout ce que nous savons, c'est que la matière noire forme des grumeaux où s'ancrent les galaxies et autres grandes structures du cosmos (les amas et les superamas de galaxies), mais qu'elle ne saurait se condenser en astres plus compacts, étoiles ou planètes. Elle est vraisemblablement constituée de particules élémentaires d'un type encore inconnu. Quant à l'énergie sombre, substance distincte ajoutée au tableau en 1998, elle serait uniformément répartie dans l'espace et expliquerait l'accélération de l'expansion universelle. Désormais, il revient à la physique des particules, et non plus seulement à l'astronomie, d'établir dans le détail la vraie nature de ces substances

étranges. Depuis huit ans, les deux disciplines ont mis en commun leurs ressources afin d'inventer et de mettre en œuvre de nouveaux outils capables de détecter et d'étudier la matière noire en s'inspirant des techniques qui se sont révélées si fructueuses pour l'analyse de particules ordinaires. Plutôt que d'étudier indirectement la matière noire en observant des objets lointains, nous voulons désormais la traquer sur Terre.

La recherche des particules de matière noire est l'une des expériences de physique les plus difficiles jamais entreprises (la recherche des particules d'énergie sombre est encore moins envisageable, et les chercheurs y ont renoncé, du moins pour l'instant). Pourtant, de notables progrès ont été réalisés. En 1994, lors du premier symposium sur ce sujet, physiciens et astrophysiciens exprimaient leur incrédulité quant à la possibilité d'observer un jour de la matière noire grâce à un détecteur de particules installé sur la Terre. Aujourd'hui, la sensibilité des détecteurs a été multipliée par 1 000 et un nouveau facteur 1 000 sera peut-être bientôt atteint par les constructeurs d'instruments. Ces détecteurs ont franchi le seuil minimal de sensibilité à partir duquel la détection des particules pressenties pour constituer la matière sombre devient envisageable. Nous saurons alors si elle existe vraiment, ou si, au contraire, nous devons bouleverser les théories sur lesquelles repose la physique moderne.

De l'autre côté du miroir

Que savons-nous pour le moment des particules qui constituent la matière noire ? Les observations astronomiques nous donnent quelques pistes. Il ne peut s'agir de matière « baryonique », c'est-à-dire de protons, de neutrons, ni de quoi que ce soit qui ait été autrefois constitué de protons ou de neutrons, telles des étoiles massives qui seraient devenues des trous noirs. En effet, la théorie du Big Bang établit de façon assez précise la quantité de matière baryonique qui était présente dans les premières minutes de l'histoire cosmique : cette matière participa à la « nucléosynthèse primordiale », c'est-à-dire aux réactions de fusion nucléaire qui, avant même l'existence des étoiles, produisirent les premiers éléments chimiques du tableau périodique. Or, les quantités d'hélium, de deutérium et de lithium qui ont été produites de cette façon sont connues assez précisément et elles indiquent qu'il n'y a jamais eu assez de matière baryonique pour constituer toute la masse de l'Univers. Par ailleurs, les particules de matière sombre doivent être électriquement neutres, sinon, elles seraient sensibles à la force électrique, elles interagiraient fortement avec les protons et les électrons dans la matière ordinaire, elles pourraient rayonner des ondes électromagnétiques (de la lumière) : bref, elles perdraient leur proverbiale discrétion.

Les neutrinos, distincts des baryons, électriquement neutres et peu enclins à interagir avec la matière ordinaire ont longtemps constitué des candidats de choix. Malheureusement, la masse qu'on leur attribue depuis peu est trop faible pour qu'ils constituent une fraction significative de la matière noire. On estime que la contribution des neutrinos est du même ordre de grandeur que celle des étoiles. De plus, précisément à cause de leur faible masse, la vitesse moyenne des neutrinos était très élevée aux premiers temps de l'Univers. On les qualifie

Peut-on voir l'invisible ?

Selon les théories invoquées par les physiciens pour expliquer leur existence (théories dites de supersymétrie), les particules de matière noire, bien que peu enclines à interagir avec les atomes ordinaires, sont néanmoins sensibles à l'interaction nucléaire faible. De ce fait, elles ont une probabilité non nulle quoique très faible d'interagir avec les noyaux de matière ordinaire.

Quand l'une de ces particules interagit avec un noyau atomique, ce dernier recule, bouscule les atomes voisins qui libèrent de l'énergie sous forme de chaleur ou de lumière. La véritable difficulté est de distinguer cette libération d'énergie de processus plus banals, telles les désintégrations radioactives.

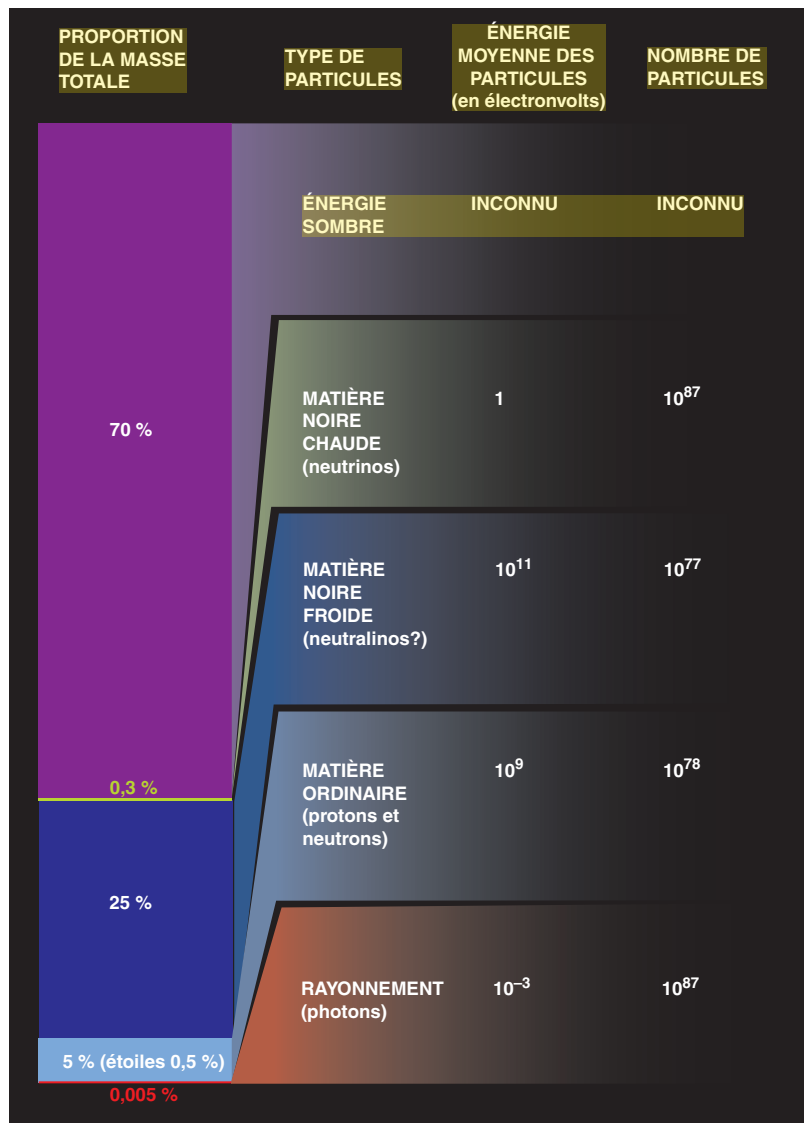
pour cela de « matière noire chaude ». Or, si l'essentiel de la matière noire avait été chaud, il aurait dispersé les grumeaux du plasma primordial qui ont, depuis, formé les galaxies et les amas de galaxies. Il faut donc que la majeure partie de la matière noire soit « froide » (c'est-à-dire que la vitesse moyenne des particules de matière noire ait été notablement inférieure à celle de la lumière aux premiers temps de l'histoire cosmique).

Ainsi, physiciens et astrophysiciens recherchent une particule non baryonique, électriquement neutre, c'est-à-dire ressemblant un peu au neutrino, mais beaucoup plus lente et massive. Leur problème est que le modèle standard de la physique des particules élémentaires ne prévoit rien de ce genre. Heureusement, certaines extensions du modèle standard, développées pour des raisons tout à fait indépendantes des besoins de l'astronomie, offrent, elles, de nombreux candidats plausibles. Parmi ces extensions, la plus étudiée étant, de loin, la supersymétrie, nous allons l'examiner de plus près.

Les physiciens des particules postulent l'existence d'une nouvelle symétrie dans la nature, la supersymétrie, qui associe à chaque particule de spin entier (ou boson) une particule de spin demi-entier (ou fermion), et réciproquement. Chaque particule connue étant ainsi dotée d'une « superpartenaire », la supersymétrie postule l'existence de particules entièrement nouvelles, ce qui la rend particulièrement attrayante pour les chasseurs de matière noire. De plus, d'après la théorie, les superpartenaires sont toutes plus lourdes que les particules connues et plusieurs rassemblent les caractéristiques que l'on attribue à la matière noire froide. Celle qui retient le plus l'attention est le neutralino, un fermion superpartenaire à la fois du photon (boson qui transmet la force électromagnétique) et du boson Z^0 (qui transmet une interaction nucléaire dite « faible »). Remarquons que le nom de neutralino est assez malheureux, car il ressemble à « neutrino », bien que ces deux particules n'aient aucun lien de parenté (même si elles partagent superficiellement quelques propriétés). Le neutralino est plus lourd que toutes les particules connues, mais c'est la plus légère des particules supersymétriques. Pour cette raison, le neutralino est nécessairement stable : une superparticule instable se désintègre en deux superparticules plus légères, ce qui est impossible pour le neutralino. Outre sa masse importante et sa charge électrique nulle, cette stabilité est une raison supplémentaire pour en faire la cible privilégiée des chasseurs de matière noire.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, on sait estimer le nombre de neutralinos qui ont été créés à l'intérieur du plasma primordial, au tout début de l'histoire cosmique. Ce plasma était une soupe brûlante constituée de tous les types de particules. Aucune particule n'y survivait longtemps : elle entraînait en collision avec une autre particule et produisait de nouvelles entités, elles-mêmes vouées à de très brèves existences. Ainsi, par exemple, la collision de deux photons pouvait produire un électron et un positon, qui, chacun, n'allaient pas tarder à rencontrer dans la foule leur antiparticule, restituant alors leur énergie de masse sous la forme de photons semblables à ceux qui leur avaient donné naissance. À un instant donné, ces destructions et ces créations s'équilibraient et le nombre moyen de particules de chaque espèce était fixé. Toutefois, tandis que le plasma se diluait et se refroidissait, la probabilité des

collisions et leur énergie diminuaient. Ainsi, par exemple, il vint un moment où l'énergie moyenne des photons n'était plus suffisante pour produire des paires électrons-positons : les créations ne compensaient plus les destructions et ces paires se sont annihilées mutuellement. Les électrons que nous connaissons aujourd'hui sont les rares survivants de l'hécatombe qui a suivi ce « découplage » des électrons vis-à-vis du plasma primordial. Les neutralinos étant beaucoup plus massifs que les électrons et leur probabilité d'interaction avec d'autres particules étant beaucoup plus faible,



2. COMPOSITION DE LA MASSE totale de l'Univers, telle qu'elle apparaît aujourd'hui aux astrophysiciens. Les étoiles et la matière visible ne constituent que 0,5 pour cent du total. Le nombre de baryons (les protons et les neutrons) de l'Univers peut être déduit des abondances relatives des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) synthétisés au cours des premières minutes de l'histoire cosmique : ces calculs montrent que la matière ordinaire (baryonique) ne représente que cinq pour cent de la masse totale du cosmos. Quant aux neutrinos (en vert), leur faible masse limite leur contribution à quelques dixièmes de pourcent. On en déduit qu'il existe d'énormes quantités de matière noire (dite froide), ce qui est confirmé par les modèles de formation des galaxies. Récemment, les astrophysiciens ont découvert que l'expansion universelle accélère, et que la géométrie de l'espace est quasi euclidienne : ils en déduisent une densité de masse-énergie telle qu'elle nécessite, en plus de la matière noire, la présence de 70 pour cent d'une substance encore plus mystérieuse, l'énergie sombre.