

Si la nature de la matière noire n'est pas encore élucidée, ce n'est pas faute de candidats. Les corps massifs ont eu la cote, mais désormais la recherche s'oriente plutôt du côté des particules.

102

Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu

Marco Cirelli



S'il fallait rédiger une annonce, elle commencerait ainsi : « Recherche nouvelle forme de matière avec des interactions très faibles, voire nulles, à la fois avec la matière ordinaire et avec elle-même. » Qui cherchons-nous ? Tout simplement la matière noire, qui compose 27% de l'Univers (la matière visible décrite par le modèle standard n'en représentant que 5%). On ignore tout d'elle, à part qu'elle existe (voir *L'insaisissable matière noire* par P. Gagnon, page 92). Reprenons les termes de l'annonce. L'agitation thermique de cette matière inconnue doit être minime, ce qui revient à dire qu'elle doit être constituée de corps qui se déplacent lentement. Dans le cas contraire, les particules s'échapperaient dans un mouvement chaotique et les grandes structures de l'Univers ne se seraient pas formées. Elle doit aussi être stable, c'est-à-dire non sujette à la désintégration naturelle, car elle était présente dans le bouillon chaotique de l'Univers primitif et elle l'est toujours dans les galaxies observées aujourd'hui, confirmant que sa « durée de vie moyenne » est très longue, voire infinie.

En résumé, la candidate idéale est invisible, froide, stable et interagit peu. On ne s'étonnera pas que la science ait d'abord cherché à la recruter parmi les corps célestes les plus bizarres. Par exemple : des astéroïdes compacts trop petits pour être détectés, ou des planètes détachées de leur orbite et trop sombres à voir, ou encore des étoiles mortes... Ce type de corps massifs, collectivement appelés MACHO pour *massive compact halo objects*, aurait le profil de l'emploi. L'exemple parfait serait une population de trous noirs errants : il s'agit d'objets par définition invisibles, peu interactifs, car éloignés et isolés,

— En bref —

> Les physiciens ignorent ce qui constitue la matière noire (27% de l'Univers). Les corps célestes massifs ont d'abord été perçus comme des candidats plausibles.

> Les scientifiques privilégient désormais l'hypothèse de nouvelles particules élémentaires, comme les neutralinos, dans le cadre de théories au-delà du modèle standard.

> Une autre hypothèse audacieuse postule que les particules concernées auraient leur origine dans des dimensions supplémentaires de l'espace-temps, enroulées et imperceptibles.

> La réécriture des lois de la gravitation est aussi une option.

lents en raison de leur masse importante et immuables en tant qu'étape terminale de l'évolution stellaire.

Les MACHO ont été activement recherchés dans les années 1980 et 1990, en utilisant le phénomène de lentille gravitationnelle (voir *L'insaisissable matière noire*, par P. Gagnon, page 92) : si la Galaxie était remplie de ces objets, l'un d'eux serait probablement passé devant une étoile, provoquant une déformation de l'image et de l'intensité lumineuse perçue. Les recherches ont cependant été infructueuses, et ces objets ne peuvent prétendre constituer la totalité de la matière noire.

TROUS NOIRS : ILS FONT LEUR GRAND RETOUR

Pourtant, les MACHO n'ont pas été abandonnés et ils font un retour remarqué aujourd'hui avec l'idée de trous noirs d'une taille telle qu'ils n'engendrent pas d'effet de lentille gravitationnelle : soit ils sont trop petits pour dévier le cours de la lumière, soit ils sont très grands, donc très rares, et la probabilité de les observer est infime ; dans les deux cas, les limites mentionnées s'évaporent. Ces objets correspondent aux trous noirs primordiaux proposés par Stephen Hawking dans les années 1970. Créés dans les tout premiers instants après le Big Bang, ils auraient été complètement découplés du reste de la matière par la suite. La fusion de certains pourrait même avoir été détectée dès 2015 par les interféromètres à ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*. Néanmoins, le sujet est chaudement débattu et davantage d'études sont nécessaires

pour vérifier si la quantité, la distribution et les propriétés de ces corps sont vraiment adéquates pour expliquer la matière noire.

Convaincus que la matière noire ne peut pas être constituée d'objets astrophysiques macroscopiques, des physiciens ont tourné leur attention vers les particules élémentaires. L'idée était qu'une grande quantité de gaz diffus composé de particules avec les bonnes propriétés serait responsable de la masse manquante. Mais rapidement, on se retrouva à nouveau dans une impasse : aucune des particules connues et décrites par le modèle standard ne coche toutes les cases !

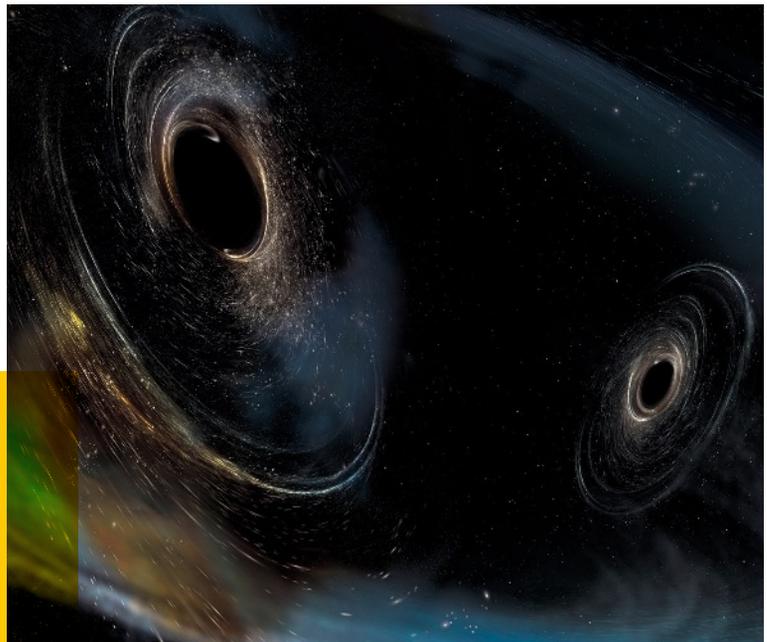
Les neutrinos sont celles qui s'en approchent le mieux : ils sont stables, sans charge électrique (donc sans interaction avec le rayonnement électromagnétique) et n'interagissent que par l'intermédiaire de la force faible, l'une des trois grandes forces fondamentales considérées par le modèle standard (voir les Repères page 6). Cependant, les mesures cosmologiques indiquent qu'ils ont une masse. Problème : des particules même très légères sont faciles à bousculer et donc acquièrent aisément une énergie thermique au

contact du bain chaud de l'Univers primitif, invalidant ainsi la condition de particules « froides ».

En conséquence, les physiciens pensent désormais que le problème de la matière noire est l'un des indices les plus concrets de l'existence de nouvelles particules, et donc d'une « nouvelle physique » encore inconnue. Pour comprendre la portée révolutionnaire de ces propositions, il est utile de passer en revue les hypothèses les plus étudiées.

La matière noire pourrait être constituée de particules prédites par une théorie hypothétique

105



→ Les corps célestes macroscopiques n'apparaissent plus comme les candidats les plus crédibles au poste de matière noire, à l'exception peut-être des trous noirs primordiaux.

dite «de supersymétrie». Cette théorie, initialement proposée dans les années 1970 puis continuellement mise à jour, formule un postulat audacieux et surprenant : pour chaque type de particules actuellement connu, il y aurait une particule jumelle aux propriétés similaires, mais pas exactement équivalentes, qui serait jusqu'ici passée inaperçue, car inaccessible à nos outils de recherche. Si ces particules exotiques, appelées « partenaires supersymétriques », existent, l'une d'entre elles pourrait constituer la matière noire.

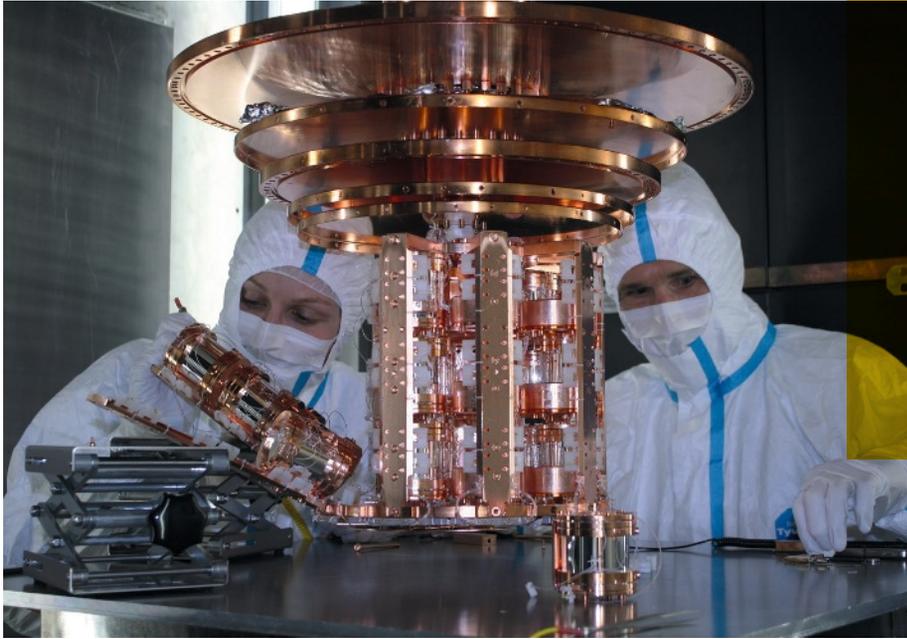
L'IMPOSSIBILITÉ D'UNE SYMÉTRIE PARFAITE

Mais reprenons les choses dans l'ordre. Il est bien établi que les particules du modèle standard appartiennent à deux grandes catégories (*voir les Repères, page 6*) : les fermions (comme les électrons, les quarks et les leptons) et les bosons (dont la particule de Higgs, les photons et les particules médiatrices de force). La différence entre elles tient à une propriété intrinsèque des particules, appelée «spin». Des considérations mathématiques assez complexes ont conduit les physiciens théoriciens dans les années 1970 à émettre l'hypothèse d'un lien profond entre les deux classes de particules. Ce lien associe un boson à chaque fermion, et inversement. Une telle association rend chaque particule plus complète, comme le côté droit d'un visage réfléchi dans un miroir complète le côté gauche. C'est pourquoi on parle de symétrie, ou plus précisément de supersymétrie (notée SuSy). Une symétrie, en physique et aussi dans la nature, rend en général une

théorie plus élégante et cohérente. Dans ce cas, SuSy remédie à une inquiétante incohérence interne du modèle standard qui conduirait à prédire une masse pour le boson de Higgs bien supérieure à celle mesurée. Surtout, elle fait l'hypothèse de l'existence d'un partenaire pour chaque particule connue : outre l'électron, il existerait un superélectron (ou «sélectron»), doté des mêmes propriétés à ceci près que c'est un boson ; et, de même, le « photino » serait à tous égards semblable au photon, à l'exception de sa nature de fermion.

Or, une symétrie aussi parfaite n'est clairement pas réaliste : s'il existait vraiment un sélectron de même masse que l'électron, nous l'aurions déjà remarqué ! Il y aurait de la

Si le sélectron,
le partenaire
supersymétrique
de l'électron,
existait et avait
la même masse, nous
l'aurions remarqué !



← Des scientifiques travaillent sur le cœur de l'expérience *CRESST* avant de l'installer dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie. Le dispositif contient des cristaux très purs, sensibles au passage des particules de matière noire qui sillonnaient la Galaxie et traverseraient la Terre.

sélectricité, des ampoules, des sélectionneurs ! L'expérience montre donc que la symétrie doit être « brisée » : les masses des particules supersymétriques seraient bien plus grandes que celles des particules ordinaires. La théorie perd beaucoup de son élégance, mais, au moins, elle évite les absurdités flagrantes. Étant plus lourdes, les particules supersymétriques se désintègrent en particules plus légères, y compris en celles du modèle standard, et cessent ainsi d'exister. Toutes sauf une.

En réalité, SuSy intègre un mécanisme, la R-parité, nécessaire pour être en accord avec les observations expérimentales, qui garantit la stabilité absolue de la particule supersymétrique la plus légère. Si cette particule est par exemple le partenaire de la particule Z du modèle standard, on se retrouve avec un candidat idéal de matière noire ! Une particule neutre, lourde et donc froide et stable grâce à la R-parité. Les particules de ce type, collectivement appelées « neutralinos », sont généralement de bons candidats pour la matière noire. La théorie n'est pas capable d'en prédire la masse de manière unique, mais seulement d'indiquer une valeur autour de 100 fois la masse d'un proton, avec une grande marge de variabilité.

Ainsi, une solution possible au problème de la matière noire émerge d'une théorie comme la

supersymétrie, qui est complexe, fascinante et apparemment sans rapport avec les phénomènes pertinents aux échelles cosmologiques. Voici un cas exemplaire du contact entre la physique de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Si l'hypothèse est correcte, la matière noire serait le premier signal d'un monde parallèle fait de particules lourdes. Une éventuelle preuve de l'existence des neutralinos résoudrait le problème cosmologique crucial de la « masse manquante » et en même temps révélerait l'autre moitié d'un monde subatomique extraordinaire jusqu'alors ignoré.

DES PARTICULES ENROULÉES DANS CINQ DIMENSIONS

Selon une autre hypothèse, la matière noire serait constituée de particules liées à l'existence d'un espace multidimensionnel plus complexe et étendu que celui que nous connaissons. Certaines théories stipulent, en effet, que notre monde ne serait que le « rez-de-chaussée » d'un immeuble avec un nombre infini de niveaux : les étages supérieurs contiendraient des copies lourdes des particules du modèle standard et l'une d'entre elles serait la matière noire. Même si le concept de copies exotiques de particules rappelle la supersymétrie, l'idée de base est radicalement différente et peut-être encore plus étonnante.

Cette théorie pose que l'espace-temps n'est pas simplement constitué des trois dimensions qui nous sont familières, plus le temps; mais qu'en chaque point il y a une ou plusieurs dimensions spatiales supplémentaires, enroulées en anneaux extrêmement petits et donc imperceptibles. L'idée fut proposée par les physiciens Theodor Kaluza et Oskar Klein dès les années 1920, puis largement oubliée. Elle est revenue au premier plan à la fin des années 1990 pour des raisons liées en partie à la solution de l'incohérence interne du modèle standard concernant la masse du boson de Higgs, que nous avons déjà mentionnée. Une version de ces théories fait également partie intégrante de la théorie des cordes.

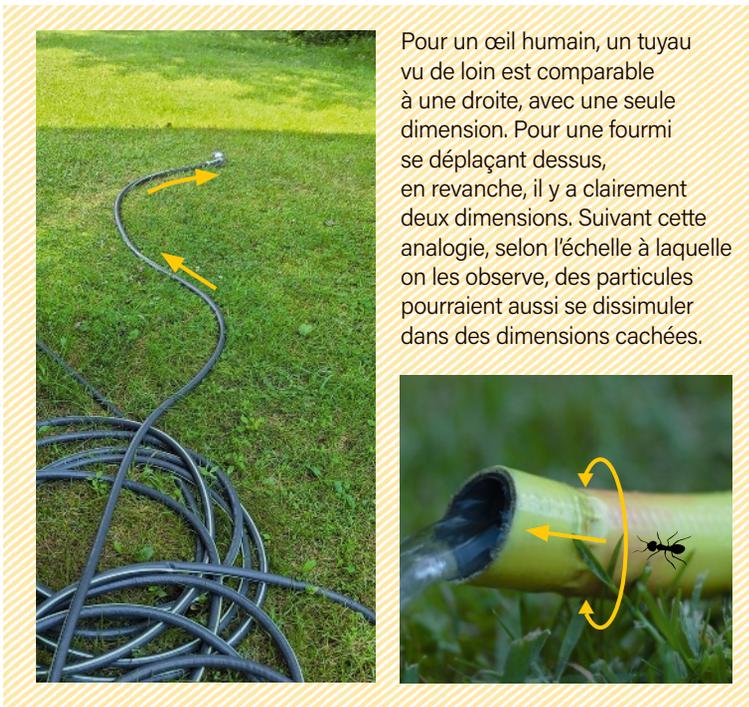
Pour comprendre de quoi nous parlons, utilisons une analogie classique, popularisée entre autres par Lisa Randall, physicienne théoricienne à l'université Harvard. Imaginons un tuyau d'arrosage posé sur la pelouse: vu de loin, il nous apparaît comme une ligne, c'est-à-dire un objet unidimensionnel. Cependant, à mesure que nous nous approchons, nous nous rendons compte que l'objet a une dimension transversale, de forme circulaire, si petite qu'elle est invisible de loin, mais

Technibaryons, Q-balls, pépites de quarks: derrière les hypothèses aux noms facétieux, il y a un travail scientifique rigoureux

très concrète et évidente de près. Par exemple, une fourmi est capable de parcourir la dimension linéaire « infinie » du tuyau aussi facilement que la dimension circulaire finie. L'idée de base des théories extradimensionnelles est que l'espace-temps lui-même ressemble à ce tuyau: chaque point (x , y , z , plus le temps t) serait en fait aussi le siège d'un anneau infinitésimal d'une nouvelle dimension. La réalité serait donc en fait 5-dimensionnelle; et les particules élémentaires seraient des entités à cinq dimensions, capables de parcourir cet espace-temps étendu exactement comme la fourmi parcourt toutes les directions du tuyau. Le fait que la dimension supplémentaire soit renfermée sur elle-même a une conséquence importante pour les propriétés des particules.

Reprenons l'analogie en forçant un peu ses limites pour voir quelle est cette conséquence. Imaginons une petite colonie de fourmis, toutes identiques et de même masse m , marchant le long du tuyau. La première fourmi ne fait que parcourir la direction rectiligne à une vitesse v . La deuxième fourmi, elle, a l'habitude de faire le tour du tuyau au fur et à mesure qu'elle le longe. Pour nous, observateurs éloignés qui ne voyons pas la dimension circulaire, le résultat est que la fourmi semble se déplacer dans une direction droite à une vitesse plus lente, disons de la moitié: $v/2$. Nous nous dirions alors: ce doit être une fourmi plus grosse, de masse $2m$. Quant à la troisième fourmi, elle se plaît à faire deux tours autour du tuyau au fur et à mesure qu'elle le parcourt: de loin elle paraît avancer avec une vitesse $v/3$ et on dira qu'elle a une

108



masse de $3m$. Et ainsi de suite. La colonie de fourmis, toutes de masse identique, nous semble donc constituée d'insectes de masse m , $2m$, $3m$, $4m$, etc.

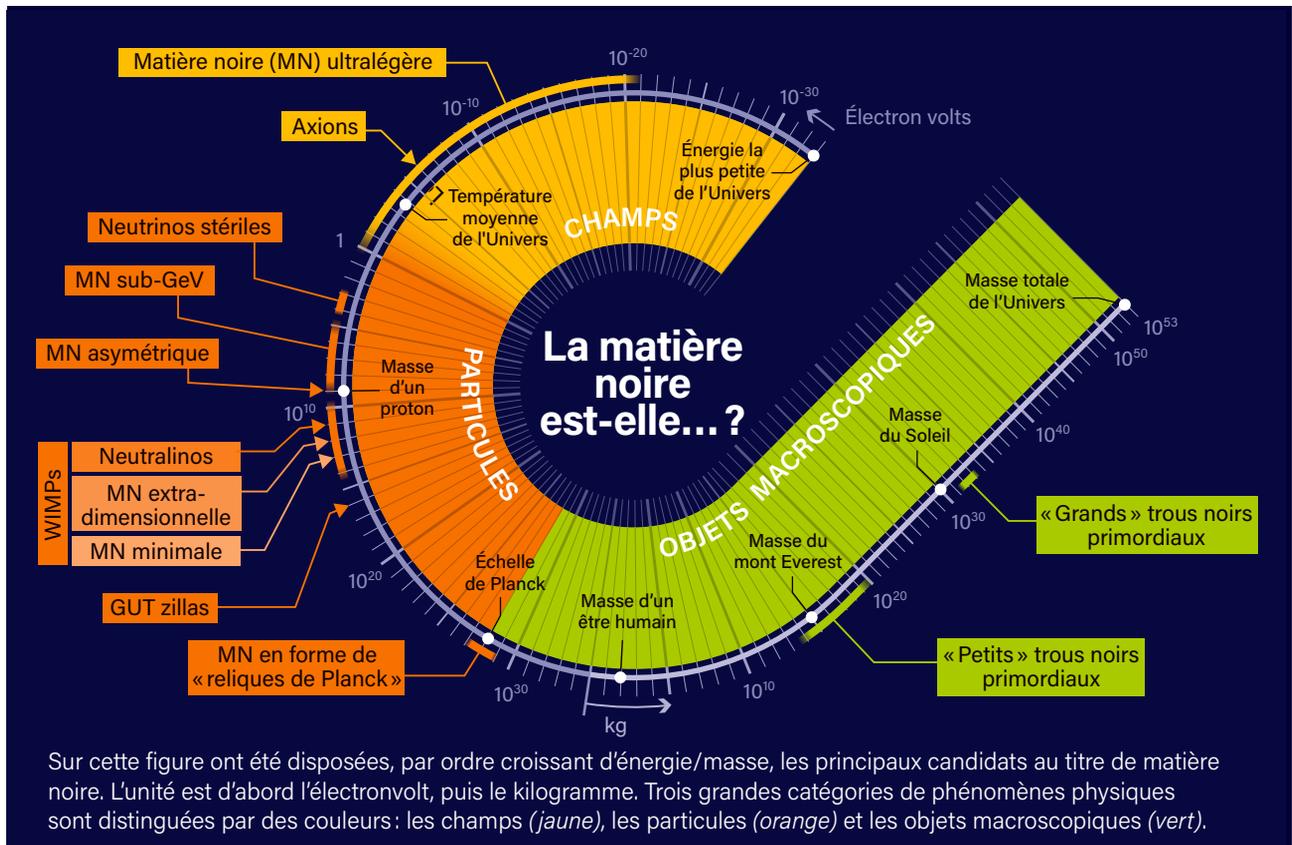
En pratique, un observateur ignorant l'existence de la dimension supplémentaire interprète comme une masse supplémentaire ce qui est en fait une impulsion confinée dans cette dimension. De même, une particule 5-dimensionnelle de masse M apparaît à un observateur comme une série infinie de particules de masse M , $2M$, $3M$, etc. On parle de tour de particules de Kaluza-Klein : celles du niveau de base sont les particules bien connues du modèle standard, tandis que celles des niveaux suivants sont des copies identiques, mais plus massives. Grâce à un mécanisme similaire à celui de la R-parité en supersymétrie, une des particules neutres du premier niveau serait stable et constituerait donc un candidat idéal pour la matière noire ! Sa masse est associée à la taille de la dimension supplémentaire et est donc un paramètre dépendant

de la théorie : typiquement, les prédictions sont d'environ 1000 fois la masse du proton, avec là encore une grande marge de variabilité.

Dans ce cas également, une solution possible au problème de la matière noire émerge d'une hypothèse audacieuse, comme celle des dimensions supplémentaires. Si ces théories sont correctes, découvrir la matière noire équivaudra littéralement à découvrir des dimensions entières de la réalité pour l'instant inexploitées.

MATIÈRE NOIRE GONFLABLE... OU CANNIBALE ?

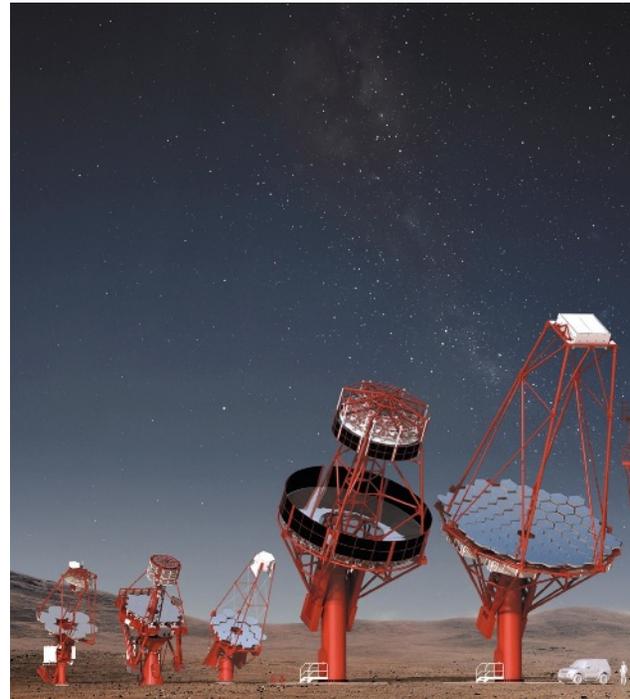
Du neutrino stérile (voir *La possible fécondité du neutrino stérile* par W. C. Louis et R. Van de Water, page 26) à l'axion (voir *La physique passe à l'axion* par C. Prescod-Weinstein, page 36), beaucoup d'autres candidats ont été ou sont encore proposés par les physiciens, bien trop pour que l'on puisse en rendre compte ici. Les



Et si l'Histoire bégayait ?

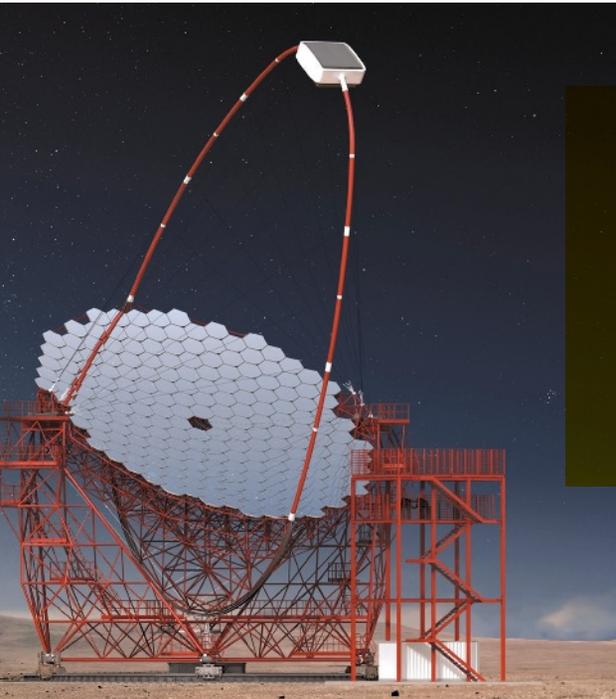
Dans les années 1840, les astronomes sont aux prises avec un défi : l'orbite de la planète Uranus, à l'époque planète la plus lointaine du Système solaire, montre certaines irrégularités en contradiction avec les lois de la mécanique céleste newtonienne. Ce qui conduit Urbain Jean Joseph Le Verrier, astronome à l'Observatoire de Paris, à postuler l'existence d'une « planète manquante » dont l'influence gravitationnelle expliquerait les anomalies de l'orbite d'Uranus. En effet, une telle planète, nommée Neptune, est découverte en 1846 par Johann Gottfried Galle, un astronome de Berlin, presque exactement au point indiqué par les calculs de Le Verrier. Un peu plus tard, c'est Mercure qui attire l'attention des astronomes : son mouvement montre également une anomalie, la précession du périhélie, non prédite par la gravité newtonienne. Le Verrier, sûr de son coup, l'interprète une nouvelle fois comme l'effet de la présence d'une autre planète, appelée Vulcain, très proche du Soleil. Malgré des décennies de recherches, et même de fausses découvertes, Vulcain n'a jamais été trouvée. En revanche, Einstein a démontré comment l'anomalie est due à une correction de la gravité newtonienne à proximité d'un corps extrêmement massif comme le Soleil et est parfaitement prédite par la théorie de la relativité générale. L'analogie avec la situation actuelle est évidente : les « anomalies » en astrophysique et en cosmologie sont-elles liées à la matière (noire), comme dans le cas de Neptune ? Ou bien sont-elles un signe d'échec des lois de la gravité, comme dans le cas de Mercure ?

110



particules SuSy et extradimensionnelles font partie de la classe des WIMPS (pour *weakly interacting massive particles*), très populaires car leur mécanisme de production dans l'Univers primordial est particulièrement convaincant. Chaque jour, ou presque, la littérature scientifique s'enrichit de nouvelles propositions : les technibaryons, les WIMPzillas, les GUTzillas, les Q-balls, les pépites de quarks... Ou de modèles tels que la matière noire minimale, mimétique, fluorescente, gonflable, cannibale... et ainsi de suite. Les qualificatifs en apparence facétieux ne doivent pas tromper : dans la plupart des cas, il y a derrière un travail scientifique rigoureux, nécessaire pour construire une théorie qui soit en accord avec les données et qui fournisse des prévisions vérifiables. L'un de ces candidats et l'un de ces modèles seront, espérons-le, celui vraiment choisi par la nature.

Même si l'hypothèse de nouvelles particules élémentaires est de loin la plus accréditée dans la communauté des physiciens, pour toutes les bonnes raisons déjà évoquées, il est important de ne négliger aucune autre piste, au moins jusqu'à ce qu'une solution convaincante soit trouvée. Une hypothèse radicale s'inspire de la remarque, extrêmement importante, que les manifestations



← Projet européen, l'observatoire CTA (*Cherenkov Telescope Array*) vise à déployer, au Chili (hémisphère sud) et aux îles Canaries (hémisphère nord), une centaine de télescopes sensibles aux rayons gamma produits par les particules de matière noire dans le halo de la Galaxie. Cette vue d'artiste traduit la diversité des équipements nécessaires : entre 8 mètres de haut pour 8 tonnes et 45 mètres pour 100 tonnes.

en 1964 comme conséquence d'une substance mystérieuse (le champ de Higgs) qui imprègne l'ensemble de l'Univers et confirmé en 2012. La particule de matière noire sera peut-être la prochaine grande découverte, attendue depuis quatre-vingts ans. L'histoire de la physique nous enseigne que, souvent, quand il s'agit de pénétrer les concepts les plus fondamentaux de la nature, il faut faire preuve d'audace dans les propositions et... de patience dans l'attente des réponses.

attribuées à la matière noire ont seulement à voir avec la gravité. La question surgit alors spontanément : au lieu de postuler l'existence d'une masse manquante, ne serait-ce pas la loi de la gravité qu'il faut changer ? Après tout, au XIX^e siècle, l'astronomie a déjà vécu un épisode comparable (voir l'encadré page ci-contre). La possibilité de repenser la gravitation a été considérée, depuis les années 1980, par une série de théories dites « MOND » (*modified newtonian dynamics*), qui réécrivent, sous différentes formes, les lois de Newton et d'Einstein dans les conditions propres des galaxies et des grandes structures. Pour le moment, aussi simples et suggestives soient-elles, MOND et ses consœurs n'ont pas encore réussi à expliquer toutes les manifestations attribuables à la matière noire à toutes les échelles. C'est pourquoi la communauté reste en grande majorité convaincue par l'idée de particules supplémentaires.

En vérité, physique des particules et cosmologie n'ont jamais été avares en hypothèses apparemment bizarres (quoique fondées sur des indices solides), mais qui se sont révélées exactes. Pensons aux neutrinos, inventés en 1930 par Wolfgang Pauli presque par désespoir et révélés en 1956. Pensons au cas du boson de Higgs, postulé

— L'auteur —

> **Marco Cirelli**
est physicien au Laboratoire de physique théorique et hautes énergies (LPTHE - CNRS & Sorbonne Université)

— À lire —

- > **M. Cirelli et al.**, *Dark matter*, à paraître dans *arXiv*, 2022.
- > **M. Cirelli et al.**, *Voyager 1 electrons and positrons further constrain primordial black holes as dark matter*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, 2019.
- > **S. Profumo**, *An Introduction to Particle Dark Matter*, World Scientific, 2017.
- > **G. Bertone et al.**, *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, Cambridge University Press, 2010.
- > **D. Hooper**, *Dark Cosmos: In Search of Our Universe's Missing Mass and Energy*, Smithsonian Books, 2009.