

équations de la relativité générale, adjoindre à cette théorie un terme était indispensable : ainsi est née la constante cosmologique. C'est Alexandre Friedmann, au début des années 1920, qui résoudra les équations de la relativité générale en présence de matière et d'une constante cosmologique et montrera que, contrairement à ce qu'Einstein avait postulé, la relativité générale avait presque toujours pour solution des univers en expansion. Cela fut confirmé par l'observation du mouvement des galaxies peu de temps après en 1927 par Edwin Hubble et Georges Lemaître. La constante cosmologique semblant privée de toute raison d'être, Einstein et de Sitter proposèrent en 1932 un modèle d'Univers fait de radiations et de matière, mais dépourvu de constante.

Néanmoins, dès 1928, les physiciens Wolfgang Pauli et Pascual Jordan furent les premiers à tenter de donner une origine physique à la constante cosmologique en la reliant à l'énergie du vide. En effet, en mécanique quantique, le vide n'est pas l'absence de tout phénomène physique ; à chaque instant des paires particule-antiparticule apparaissent et disparaissent. Le bilan de ce foisonnement est qu'en moyenne, le vide possède une énergie et que celle-ci joue pour l'Univers le même rôle qu'une constante cosmologique. Cette observation est d'une richesse que les physiciens n'ont pas encore complètement exploitée.

Malheureusement, le calcul de cette énergie du vide par Pauli et Jordan donne un résultat si grand que, si on l'appliquait à l'Univers statique d'Einstein, celui-ci tiendrait entre la Terre et la Lune. Cet échec retentissant a conduit les cosmologues à se cacher la tête dans le sable pendant

— En bref —

> En 1998, une accélération de l'expansion de l'Univers a été mesurée sans qu'on puisse l'expliquer.

> Avec l'hypothèse d'une constante cosmologique, débattue dès le début du ^{xx} siècle et toujours défendue, cette accélération serait une propriété intrinsèque de l'Univers.

> Selon une autre hypothèse, l'Univers subirait l'effet d'une énergie sombre dont la physique reste inconnue.

> Les champs de matière sombre pourraient agir différemment selon les échelles et la densité de matière, s'adaptant ainsi à leur environnement. Cette hypothèse porte le nom de « champ caméléon ».

des décennies. Aujourd'hui encore, ils sont toujours dans l'incapacité de calculer l'énergie du vide dans le cadre du modèle standard. Seule une théorie complète comme pourrait l'être la théorie des cordes le rendrait possible. En pratique, c'est encore loin d'être faisable.

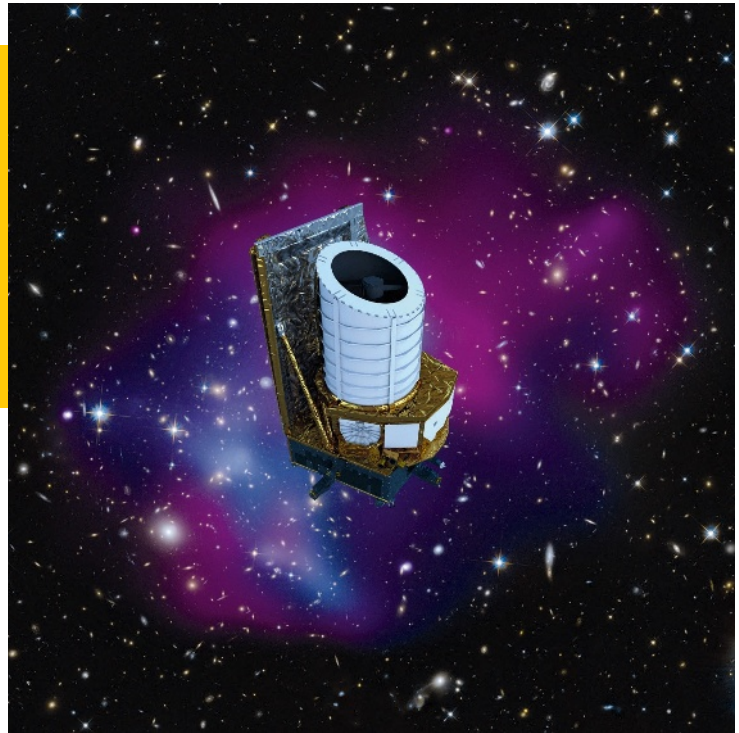
Pourtant, la nécessité d'une constante cosmologique avait commencé à faire son retour dès la fin des années 1950, quand l'astronome Allan Sandage montra que l'âge de certaines étoiles semblait être plus grand que celui déduit du modèle d'Univers d'Einstein-de Sitter. Ce paradoxe est levé s'il existe une constante cosmologique. Les observations depuis 1998 lui ont d'ailleurs donné une valeur : elle est incroyablement petite, 29 ordres de grandeur plus petite même que la densité de l'eau. Rien dans les théories de la physique subatomique ne permet de rendre compte d'une telle valeur, si ténue qu'elle pourrait mettre la cosmologie dans une impasse théorique.

UNE PRESSION NÉGATIVE

Cependant, même si la constante cosmologique rend compte des observations, il est tout à fait envisageable que l'accélération soit liée non à une propriété immuable de l'Univers, mais à un phénomène dont l'accélération serait la conséquence. Par exemple, une nouvelle forme d'énergie, qui dicterait la dynamique de l'Univers actuel : la fameuse énergie sombre. Aucune théorie n'en existe encore, et seules certaines de ses caractéristiques sont connues.

Aux plus grandes échelles comme celles du cosmos, elle se comporte comme un fluide

→ La mission *Euclid*, prévue pour courant 2022, sera en mesure de scruter la forme et le décalage vers le rouge des galaxies sur les 10 derniers milliards d'années. De quoi mieux mesurer l'accélération de l'expansion de l'Univers et préciser, peut-être, la nature de l'énergie sombre.



qui affiche des caractéristiques de pression et de densité d'énergie très singulières. En effet, tout se passe comme si la pression était négative et exactement opposée à la densité d'énergie, cette dimension négative étant la cause de l'accélération de l'expansion. Si, dans l'histoire de l'Univers, la pression n'a pas toujours été l'exact opposé de la densité, alors la densité d'énergie sombre n'a pas non plus été constante dans le temps. On pourrait en savoir bientôt plus à ce sujet, car l'expérience *Euclid*, de l'Agence spatiale européenne, observera le passé de l'Univers, jusqu'à 10 milliards d'années en arrière. Son lancement est prévu au second semestre 2022.

Autre caractéristique propre à l'énergie sombre, elle serait décrite par un champ scalaire. Pour comprendre, un petit détour s'impose. La loi de la gravitation universelle énoncée par Newton enseigne que tout corps massif tombe vers le sol : cette propriété de la matière est due au champ gravitationnel créé par la Terre par lequel les corps pesants tombent vers les lieux où ce champ prend une valeur minimale. De même, un champ électrique accélère des particules chargées, tandis qu'un champ magnétique les met en rotation. Dans le premier cas, le champ gravitationnel est un scalaire, c'est-à-dire un nombre attribué en chaque point de l'espace comme peut l'être le champ de température qui nous renseigne sur la distribution de températures dans l'atmosphère. Les champs électriques et magnétiques sont, eux, des vecteurs, c'est-à-dire que, comme la vitesse d'un objet, ils sont définis par une direction et une intensité.

Le premier exemple de théorie de champ scalaire qui possède cette sensibilité à l'environnement et serait un candidat pour décrire l'énergie sombre date de 1939 et fut écrit par Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Il a pour origine un tout autre problème et a resurgi il y a une dizaine d'années pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers. La relativité générale décrit la dynamique du champ gravitationnel ; mais en mécanique quantique, chaque champ est associé à une particule par la dualité onde-particule mise en avant par Niels Bohr. Il y a donc une particule qui accompagne la gravitation et se nomme le « graviton ». Il n'a jamais encore été observé expérimentalement, mais personne ne doute de son existence.

UNE MASSE POUR LE GRAVITON

Une de ses caractéristiques fondamentales est son absence de masse. Cette propriété étrange est intrinsèquement liée au fait que l'action de la gravitation a une portée infinie, c'est-à-dire que deux objets massifs, aussi éloignés