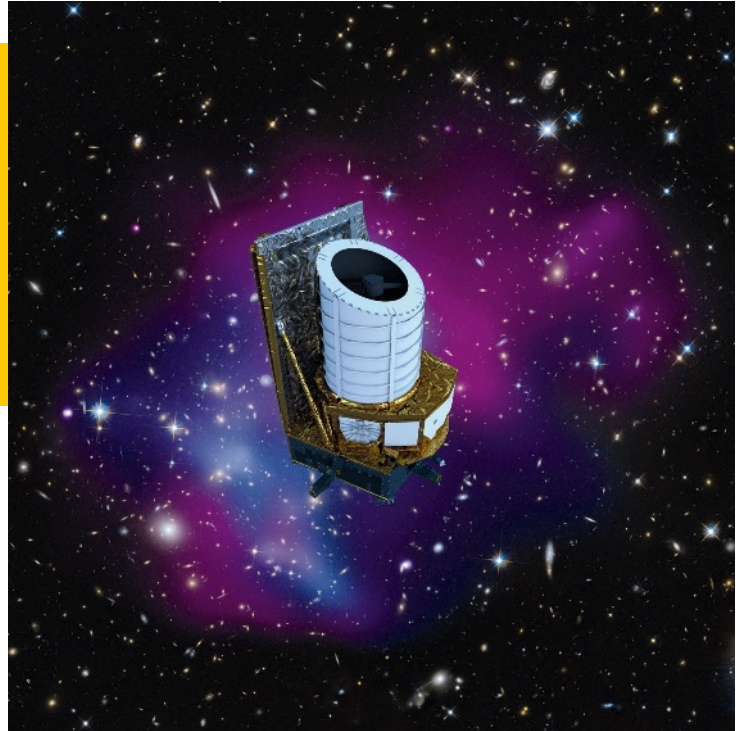


→ La mission *Euclid*, prévue pour courant 2022, sera en mesure de scruter la forme et le décalage vers le rouge des galaxies sur les 10 derniers milliards d'années. De quoi mieux mesurer l'accélération de l'expansion de l'Univers et préciser, peut-être, la nature de l'énergie sombre.



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

# La gravitation massive porterait en elle une cinquième force entre objets massifs, qui viendrait en complément des quatre forces fondamentales. Ce serait une catastrophe

soient-ils l'un de l'autre, s'attirent toujours. Ainsi, la portée de l'interaction gravitationnelle est inversement proportionnelle à la masse du graviton, et, donc, une masse nulle implique une portée infinie. De la même manière, le photon, qui est la particule liée au champ électromagnétique, est aussi sans masse et la portée de la force électromagnétique est infinie.

Dans ce contexte, Fierz et Pauli se posèrent la question suivante : peut-on donner une masse au graviton ? Cela aurait une application directe sur la physique du cosmos. En effet, si la portée de l'interaction gravitationnelle était plus petite que la taille visible de l'Univers, alors les objets lointains seraient moins liés entre eux et apparaîtraient donc comme accélérés. La gravitation massive serait ainsi une théorie d'énergie sombre.

Mais ce n'est pas sa seule caractéristique. En effet, un graviton massif possède cinq polarisations, c'est-à-dire cinq états possibles. Le quantum de lumière, ou photon, n'en a que deux qui peuvent être séparées au laboratoire avec de simples filtres polarisants. Pour le graviton sans masse, il n'y a que deux polarisations comme le photon. De façon surprenante, l'une des trois polarisations supplémentaires du graviton massif correspond à un champ scalaire, et, comme nous l'avons déjà évoqué, ce champ est sensible à la présence de matière environnante. Malheureusement, il interagit avec elle de façon presque aussi forte que la gravitation.

La conséquence inévitable est que la gravitation massive porte en elle une cinquième force entre objets massifs, qui viendrait en complément des quatre forces fondamentales : électromagnétique, gravitationnelle et les deux forces

nucléaires dites « fortes » et « faibles ». C'est une catastrophe, car l'existence d'une cinquième force est quasiment interdite par la physique des objets orbitant dans le Système solaire. Tellement que la gravitation massive semble, au premier abord, irrémédiablement exclue par l'expérience et envoyée aux oubliettes des idées brillantes, mais déconnectées du monde sensible.

À moins que... En 1972, Arkady Vainshtein a proposé un mécanisme qui réduit l'intensité de la cinquième force due au graviton massif. En effet, la théorie de Fierz-Pauli n'est pas une version complète de la gravitation massive. C'est une théorie linéaire, c'est-à-dire que le champ gravitationnel y est proportionnel à la quantité de matière qui le crée. Mais la relativité générale, c'est-à-dire la théorie décrivant le graviton sans masse, est non linéaire ; la relation de proportionnalité n'y est pas vérifiée. La théorie de la gravitation massive doit donc également être non linéaire. Quand Vainshtein inclut les premières corrections non linéaires à la théorie de Fierz-Pauli, il s'aperçut que celles-ci venaient modifier l'intensité de la cinquième force, laquelle disparaîtrait presque totalement en deçà d'une distance désormais connue sous le nom de « rayon de Vainshtein ». Dans le Système solaire, ce rayon est si grand qu'aucun effet de cinquième force ne peut se manifester. Cette propriété porte le nom d'« écrantage » et n'est pas sans rappeler l'effet d'une cage de Faraday, où le champ électromagnétique porté par la foudre ne peut pénétrer. Ici, c'est le champ scalaire de la gravitation massive qui ne pénétrerait pas dans le Système solaire, mais resterait actif aux échelles cosmologiques, où il serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Malheureusement, une théorie complète de la gravitation massive reste encore à construire malgré les nombreux progrès depuis 2010.

Des enseignements peuvent être tirés de l'exemple précédent. D'abord, il est naturel qu'une théorie d'énergie sombre voie ses effets se transformer en une cinquième force dans le Système solaire. Pour éviter que cette théorie contredise ce qu'on sait du mouvement des objets orbitant dans le Système solaire, il est donc nécessaire que ses effets soient écrantés. De ce fait, l'énergie sombre peut jouer son rôle pleinement aux grandes échelles et être responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers tout en préservant les propriétés de la gravitation locale. Elle serait donc cachée dans notre environnement planétaire et solaire. Heureusement, il n'existe que quatre mécanismes d'écrantage, ce qui rend la physique de l'énergie sombre dans notre environnement relativement simple.

## LE MÉCANISME DE CAMÉLÉON

En plus du mécanisme de Vainshtein, une autre façon possible d'écranter un champ d'énergie sombre est le «mécanisme de caméléon». Un caméléon serait un champ d'énergie sombre,

associé à des «particules caméléons» (toujours cette particularité de la physique quantique), qui s'adapte à son environnement en devenant très massif dans la matière très dense. Il agirait même d'autant moins qu'il est massif ; la portée de son action serait alors si faible qu'un caméléon interagirait très peu avec la matière environnante et ne créerait que très peu d'effet de cinquième force. La force due au caméléon, exercée par le Soleil sur la Terre, serait ainsi minuscule. Cependant, une petite cinquième force serait suffisante pour influencer la distribution des galaxies de l'Univers. Cet effet sera aussi recherché par l'expérience *Euclid*.

Mais est-ce que cela signifie que l'énergie sombre n'a aucun effet local sur Terre ? Pas forcément, car l'écrantage de l'énergie sombre n'est jamais parfait. En particulier pour les modèles de caméléons, car pour les modèles avec écrantage à la Vainshtein, la cinquième force est écrantée jusqu'aux échelles cosmologiques. En revanche, un caméléon se laisserait détecter dans certaines expériences de grande précision sur Terre ou en orbite terrestre. La force due à un caméléon est ainsi activement recherchée dans les expériences testant la gravitation à très courte distance, sous l'échelle du dixième de millimètre.

Cette force est aussi un des enjeux de l'expérience *Microscope*, du Centre national d'études spatiales (Cnes), dont le satellite orbitant à 700 kilomètres de la Terre donne corps à l'expérience de pensée de Galilée depuis la tour de Pise. Au lieu d'un marteau et d'une plume, ce sont deux cylindres concentriques de titane et de platine, à bord du satellite, dont les chutes vers la Terre sont comparées. La différence d'accélération de ces corps est mesurée avec une précision d'un centième de milliers de... milliards ! À ce niveau de précision, la force caméléonique pourrait apparaître malgré l'écrantage qu'elle subit de la Terre et du satellite lui-même. Les premiers

117



← L'expérience *Xenon1T* de détection de matière noire (ici, le détecteur avec ses tubes photomultiplicateurs) a été conduite entre 2016 et 2018 dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie.