

▶ ÉNERGIE sombre, cette étrange "force" qui accélère l'expansion de l'Univers et qui compte pour les trois quarts de sa substance, ne serait-elle simplement qu'un effet de la matière? C'est l'hypothèse audacieuse que présentent Jean-Michel Alimi (1) et André Füzfa (2) dans un numéro récent de la savante *Physical Review* (3). L'énergie sombre n'aurait aucune existence propre. Elle serait simplement la conséquence d'une pesanteur "anormale" de l'autre face

obscure de l'Univers : la matière noire (Zoom). "Nous pensons que cette matière invisible, largement plus abondante à l'échelle de l'Univers que la matière ordinaire, ne res-

\rightarrow 700m

Matière noire : Matière de nature inconnue, totalement différente de la matière ordinaire fles atomes dont nous sommes faits) FIIe n'émet aucune lumière et ne se détecte que par ses effets gravitationnels.

sent pas la gravité de la même facon que celle-ci", précise André Füzfa, Cette différence provoquerait l'émergence de l'énergie sombre et expliquerait l'accélération de l'Univers. Mais elle obligerait à une révision drastique de la théorie de la relativité générale...

"Un principe, à la base de la théorie d'Einstein, dit que deux corps de masse et de composition différentes tombent exactement de la même façon s'ils sont soumis à la même pesanteur, explique Jean-Michel Alimi. Ce principe d'équivalence est l'un des piliers de la relativité générale et il est extrêmement bien vérifié, en laboratoire comme dans le Système solaire. Mais que se passerait-il s'il ne s'appliquait pas à

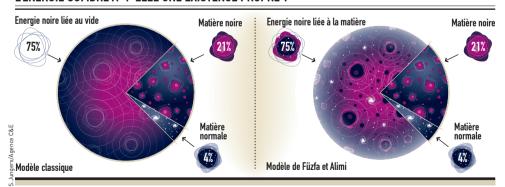


Tout ce qui brille dans le cosmos ne compte pour presque rien dans son contenu énergétique. Ainsi, cette image ne montre rien de la matière noire, qui domine la masse des galaxies, et moins encore de l'énergie sombre, qui gouverne le destin de l'univers.

l'échelle de l'Univers tout entier? C'est la première question que nous nous sommes posée." Quand les deux chercheurs se penchent sur ce problème, il y a trois ans, il ne s'agit encore que d'une réflexion théorique, "presque un jeu", un défi technique portant sur les équations comme les théoriciens aiment s'en lancer. Peu à peu cependant, des développements

fascinants émergent des calculs... "Nous avons d'abord réalisé que la relaxation du principe d'équivalence à grande échelle entraînait naturellement une expansion accélérée", se souvient André Füzfa. Intrigués, les deux chercheurs persévèrent : "Pour produire cette expansion accélérée, il fallait introduire dans l'Univers un nouveau type de matière noire."

L'ÉNERGIE SOMBRE A-T-ELLE UNE EXISTENCE PROPRE ?



Tandis que la plupart des modèles d'énergie sombre en font une entité indépendante, ayant une existence propre (à gauche), le modèle de Füzfa et Alimi la lient à la matière, sans en modifier la proportion (à droite). Chez les deux scientifiques, c'est parce que la matière noire réagit différemment à la gravité (comparée à la matière ordinaire, baryonique, celle dont nous sommes faits) que l'énergie sombre existe et provoque une expansion accélérée de l'Univers.

Pour produire une expansion cosmique accélérée,

il faut introduire un nouveau type de matière dans l'Univers

Une substance invisible qui viole le principe d'équivalence, et dont la surabondance à l'échelle des amas de galaxies

 \rightarrow Zoom

Selon le **principe de** Mach, du nom du physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916). la masse d'un corps résulte de l'influence gravitationnelle de l'ensemble des corps de l'Univers. Il n'a à ce jour été ni confirmé ni infirmé. induirait une modification de la gravité (trahie par l'accélération cosmique). Mais aussi une substance quasi absente dans nos parages, où la matière ordinaire (dite baryonique) respecte scrupuleusement la physique d'Einstein. "Et finalement, nous nous sommes rendu compte que les quantités de

matière normale et de matière noire prédites par notre modèle correspondaient à celles mesurées indépendamment par d'autres tests cosmologiques."

La fin d'une énigme ?

Un succès éclatant, qui signe la fin de l'énigme de l'énergie sombre ? "Nous n'en sommes pas là, tempère Jean-Michel Alimi. Bien sûr, la prédiction par notre modèle du taux d'expansion de l'Univers. de sa quantité de matière noire et de sa fraction de matière baryonique nous rendent confiants. Mais nous ne sommes qu'au début de nos travaux !" D'autant que la concurrence est rude : depuis que l'accélération universelle s'est invitée à la table des cosmologistes en 1998, plusieurs dizaines de modèles ont été proposés pour l'expliquer...

Le plus étonnant est que l'énergie sombre figurait en germe dans la relativité générale, bien avant qu'on ne la découvre en observant l'accélération de l'expansion de l'Univers! Dès 1917, guidé par des considérations philosophiques issues du principe de Mach (Zoom), Einstein l'avait introduite dans ses équations sous la forme d'une "constante cosmologique" notée Λ, une force de répulsion uniquement sensible aux échelles cosmiques et due à une forme d'énergie inconnue, mais omniprésente. Il l'avait ensuite utilisée pour contrer la force de gravité et sauvegarder le modèle d'Univers statique auguel il crovait tant.

Nous savons aujourd'hui que le cosmos est loin d'être statique et pourtant, paradoxalement, "la constante cosmologique est aujourd'hui la seule interprétation élégante de l'énergie sombre", estime l'Espagnol Alvaro de Rujula, qui a dirigé la division de physique théorique du Cern. Pour le physicien, A symbolise tout simplement l'énergie du vide. Autrement dit, ce qui reste de l'espace lorsqu'on lui a tout enlevé, matière et rayonnement. Répulsive, identique en tout lieu et en tout temps, elle voit son importance relative augmenter à mesure que l'Univers s'étend, tandis que la matière et l'énergie qu'elle porte se diluent dans le cosmos. Voilà pourquoi l'expansion s'accélère!

Séduisant? Sans doute trop, hélas. Car selon qu'on la calcule par les équations de la physique des particules ou par celles de la cosmologie, la constante cosmologique diffère d'un facteur... 10120 (un 1 suivi de 120 0). De quoi en perdre son latin!

Une troublante coïncidence

D'autant qu'il y a un autre souci : si l'énergie noire est due à la constante cosmologique, immuable dans l'espace et dans le temps, elle a été totalement négligeable face à la densité d'énergie de la matière au début de l'Univers. De même, elle sera très largement prédominante dans le futur. N'est-il pas alors étrange que nous, observateurs conscients, soyons justement là pour l'observer au moment même où elle possède une valeur "raisonnable", c'està-dire comparable à la densité d'énergie de la matière (4) ? Que cache cette "coïncidence cosmique" dénoncée par de nombreux cosmologistes?

Confronté à des questions aussi profondes, "un théoricien qui ne s'intéresse pas au problème de l'énergie noire devrait être jeté en prison!" s'amuse Alvaro de Rujula. De fait, de nombreux modèles alternatifs à la constante cosmologique ont fleuri pour l'expliquer (voir encadré p. 37)! "Ces travaux sont parfois des approches ad hoc", prévient Jean-Michel Alimi. Elles reviennent grosso modo à ajouter un terme à une équation et à voir ce que cela donne... "Au contraire, nous avons trouvé que l'énergie sombre était induite par l'existence de la matière noire en partant d'une réflexion sur les principes fondamentaux de la physique", précise-t-il. Et surprise : bien qu'il intègre la violation du principe d'équivalence, le modèle reste compatible avec la relativité générale à l'échelle du Système solaire, là où elle est si bien vérifiée. Que demander de plus?

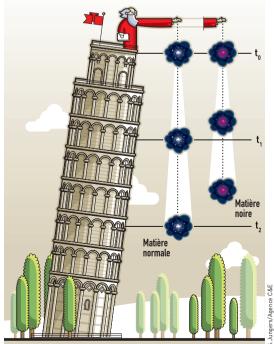
"Des tests observationnels", répond l'astrophysicien Pierre Astier, spécialiste des observations cosmologiques au LPNHE (5). En premier lieu : comment prouver que la matière noire ne réagit pas à la gravité comme la matière ordinaire ? "L'idéal serait de répéter l'expérience de Galilée : former une boule de matière noire récupérée dans le cosmos, grimper au sommet de la tour de Pise et la lâcher en même temps qu'une boule de matière normale!" glisse

Le principe d'équivalence,

pilier de la relativité générale d'Einstein, est-il caduc?

Le principe d'équivalence stipule que deux corps de masse et de composition différentes plongés dans un même champ de gravitation sont accélérés de la façon identique. Vérifié par Galilée sur la tour de Pise, il pourrait ne pas s'appliquer à matière noire.

UN PRINCIPE REMIS EN CAUSE?



Le printemps des théoriciens

Les problèmes rencontrés par l'explication la plus simple à l'énergie sombre (l'existence d'une constante cosmologique) ont fait fleurir de nombreux modèles alternatifs. Pour certains théoriciens, l'énergie noire est provoquée par une constante cosmologique variable. C'est en gros ce que propose le modèle dit "de la quintessence". Pour d'autres, elle est due à une modification de la gravité à grande échelle. D'autres encore préfèrent invoquer des tachyons (d'hypothétiques particules supraluminiques), ou un ésotérique "gaz de Chaplygin" [1]. Mais peut-être qu'en réalité l'énergie sombre est due à une nouvelle gravité induite par l'existence de dimensions supplémentaires! Bien sûr, certaines branches de cet arbre buissonnant sont plus solides que d'autres. Mais bien malin qui peut dire aujourd'hui celles qui survivront à l'élagage du temps...

(1) Du nom du physicien russe Serguei Chaplygin (1869-1942), il s'agit d'un fluide théorique dont la pression est inversement proportionnelle à la densité.

Jean-Michel Alimi, en guise de boutade. Si les deux boules ne tombent pas à la même vitesse, c'est que le principe d'équivalence est violé... "Plus sérieusement, les propriétés des grandes structures de l'Univers et la façon dont elles se forment sont de bons tests de notre modèle, conviennent les deux physiciens. Car des galaxies aux superamas, la proportion de matière noire augmente. Et avec elle les effets de notre 'pesanteur anormale'." Il faudra toutefois du temps pour que les chercheurs peaufinent leurs équations et les implémentent dans les grands programmes informati-

ques qui simulent l'évolution cosmique. En attendant donc, suspense...

(1) Laboratoire Univers et théories, observatoire de Paris-Meudon.

(2) Groupe d'application des mathématiques aux sciences du cosmos, université de Namur.

(3) Physical Review D 75, 123007 (2007).

(4) Elle vaut le triple.

(5) Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies.

Pour tester leur modèle, André Füzfa et Jean-Michel Alimi devront l'implémenter dans les grandes simulations informatiques d'évolution de l'Univers, comme le projet Horizon (qui montre ici la distribution des galaxies dans un Univers de 1,5 milliards d'années).

