Article paru sur www.larecherche.fr [imprimer]

ÉNERGIE NOIRE

Comment l'Univers s'est assombri

Les cosmologistes en sont aujourd'hui convaincus : l'Univers est constitué majoritairement d'une énergie noire, dont les effets s'opposent à la gravité. Mais la nature de cette entité est plus énigmatique que jamais.

Tous les deux ans, le Texas Symposium réunit la fine fleur des astrophysiciens et des cosmologistes - occasion, pour ces derniers, d'exposer leurs travaux les plus importants. En 1998, cette conférence se tenait à Paris. Et elle était très attendue, le bouche-à-oreille ayant bien fonctionné. Car Saul Perlmutter, du laboratoire Lawrence Berkeley, en Californie, et Brian Schmidt, de l'université Johns Hopkins, dans le Maryland, avaient fait le voyage pour présenter des résultats révolutionnaires, à proprement parler.

En effet, bien loin de ralentir, comme on le pensait depuis soixante-dix ans, l'expansion de l'Univers serait en train d'accélérer. La raison ? Un phénomène mystérieux, bientôt qualifié d'« énergie noire » - faute de mieux ! -, et qui, selon les estimations de Perlmutter et de Schmidt, représenterait le constituant majeur de l'Univers.

Dix ans ont passé depuis l'annonce de cette découverte surprenante, qui suscita des réticences proportionnées. Mais aucune objection de fond n'est parvenue à la mettre en cause. Elle a été confirmée par de nombreuses observations astronomiques, et étayée par diverses approches expérimentales. Par conséquent, rares sont les chercheurs qui doutent encore de la présence de cette énergie noire dans l'Univers.

Force est néanmoins de constater que les travaux réalisés durant la dernière décennie ne sont pas parvenus à expliquer sa nature. Et les modèles théoriques visant à décrire son origine, se sont, tour à tour, révélés infructueux. Si bien que, sous certains aspects, l'énergie noire apparaît encore plus énigmatique qu'il y a dix ans.

Décalage vers le rouge

Pour en saisir pleinement les enjeux, un bref retour en arrière est nécessaire. Au début du XXe siècle, on pensait que l'Univers était statique, immuable - parce que cette hypothèse était la plus simple, et que l'espace ne semblait soumis à aucune dilatation propre. Mais les observations réalisées à partir de 1929 par l'astronome américain Edwin Hubble modifièrent radicalement cette vision de l'Univers.

Il remarqua que les spectres de la lumière émise par les galaxies proches de la nôtre étaient décalés vers les grandes longueurs d'onde - le rouge, dans le spectre de la lumière visible. Ce décalage impliquait un mouvement de fuite des galaxies, et renseignait sur leur vitesse. Il était, par ailleurs, proportionnel à la distance des galaxies. Plus celles-ci étaient éloignées, plus leur vitesse était importante - une relation de proportionnalité connue sous le nom de « loi de Hubble ».

Ce résultat démontrait que l'Univers n'était pas statique, mais en expansion. Et il apportait la preuve, à ce moment la plus directe, que

l'Univers primordial devait être extrêmement dense. Il se dilatait, depuis, de façon régulière, sous l'impulsion de la vitesse initiale acquise lors de l'« explosion » originelle.

Durant le demi-siècle qui suivit, les cosmologistes se sont persuadés que la force de gravitation exercée par toute forme de matière ralentissait cette expansion. Il est vrai que, sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, les objets qui composent l'Univers sont attirés les uns vers les autres, diminuant ainsi leur vitesse relative. L'expansion pourrait ainsi s'achever, et peut-être même s'inverser, comprimant l'Univers jusqu'à une sorte de « Big Crunch ».

Détecteurs de photons

Impossible, toutefois, d'en apporter la preuve, faute de pouvoir mesurer l'évolution de l'expansion, et vérifier la loi de Hubble pour des distances très importantes. Car dans le ciel des astronomes, aucune étoile n'était assez lointaine, et ne brillait assez, pour indiquer à quelle vitesse les astres se déplaçaient il y a de ça plusieurs milliards d'années.

Jusqu'au début des années 1990. C'est à ce moment, en effet, grâce à des avancées technologiques comme la mise au point de nouveaux détecteurs de photons, que les cosmologistes ont commencé à tirer profit d'un certain type de supernovae - terme désignant les phénomènes issus de l'explosion d'une étoile (lire « Autopsie d'une supernova », ci-dessous). Qualifiées de « Ia » par les astrophysiciens, ces supernovae sont peu nombreuses, éphémères, mais parmi les plus brillantes qui soient. Elles présentent surtout une luminosité très similaire, bien plus que les galaxies étudiées par Hubble. D'où l'idée de les utiliser comme des « bougies de référence » : le rapport entre leur luminosité absolue et apparente indiquerait leur distance, et le décalage de leur spectre d'émission, leur vitesse. On mesurerait ainsi le ralentissement présumé de l'expansion.

Supernovae peu brillantes

Plusieurs années ont été nécessaires pour développer des caméras permettant de traquer, d'enregistrer, et d'analyser la luminosité d'un échantillon représentatif de supernovae. Tels étaient les objectifs visés par les équipes de Perlmutter et de Schmidt. Bon nombre d'astronomes étaient très sceptiques sur leurs chances de succès. En 1998, elles étaient pourtant les premières à faire état de leurs travaux fondés sur l'étude d'une soixantaine de supernovae, datant d'une période comprise entre un et six milliards d'années [1] .

Et là, énorme surprise : les supernovae étaient, en moyenne, 25 % moins brillantes et plus distantes que prévu ! Il fallait alors admettre que les distances augmentaient en raison d'une expansion accélérée de l'Univers, qui se dilatait à un rythme de plus en plus important. Or un univers composé uniquement de matière devait voir son expansion décélérer. L'accélération était donc imputable à une forme d'énergie de nature « différente ».

Fond diffus cosmologique

L'analyse de la luminosité des supernovae lointaines suggérait que l'accélération de l'expansion correspondait à un phénomène relativement récent dans l'histoire de l'Univers - il y a cinq milliards d'années environ [fig. 1] . Avant cela, l'expansion décélérait, dominée manifestement par l'influence de la matière. Cela signifie que, contrairement à la densité de

matière, qui se dilue et qui décroît avec l'expansion, la densité de l'énergie noire lui demeure insensible (ou alors très peu) : la proportion d'énergie noire augmenterait donc avec l'expansion. Le problème, c'est que ce portrait-robot ne correspondait à rien de connu dans les tablettes des astrophysiciens.

Pour être vraiment acceptée, l'existence de l'énergie noire avait besoin d'être appuyée par des observations indépendantes. La première a été apportée grâce à une connaissance plus fine du « fond diffus cosmologique » - un rayonnement électromagnétique émis 380 000 ans après le Big Bang, lorsque l'Univers s'est refroidi et que la matière et la lumière se sont découplées. Détectable dans les longueurs d'onde millimétriques, il frappe la Terre depuis toutes les directions de l'espace et de façon globalement uniforme, car ce rayonnement présente d'infimes fluctuations à très petite échelle.

Pour cartographier ces fluctuations, et limiter, au maximum, l'absorption du fond diffus cosmologique par l'atmosphère, un ballon stratosphérique dénommé « Boomerang » avait été lancé en 1998 au-dessus du pôle Sud. Deux ans plus tard, il fournissait des mesures quarante fois plus précises que les données précédentes [2] .

Oscillations acoustiques

Une avancée doublement précieuse. Car la distribution des fluctuations du fond diffus cosmologique est directement corrélée à la géométrie de l'Univers - plate, selon les résultats obtenus par Boomerang. La connaissance de cette géométrie permet alors de calculer la densité de l'Univers. Or en comparant cette densité à celle de la matière présente dans l'Univers, on obtient un écart de 70 % ! Soit une quantité comparable à la proportion d'énergie noire telle qu'elle venait d'être déterminée *via* les supernovae. À partir de 2003, et jusque très récemment, au printemps 2008, le satellite américain WMAP a fourni des cartographies encore plus précises et plus détaillées du fond diffus cosmologique [3] . Les calculs fondés sur cette méthode indiquent ainsi que l'énergie noire constituerait 72 % du Cosmos.

Une approche totalement différente a permis d'étayer ces résultats. Elle s'appuyait sur l'étude d'un phénomène résultant, lui aussi, des conditions qui prévalaient peu après le Big Bang : les « oscillations acoustiques baryoniques ». Deux forces, de nature contraire, étaient alors en compétition : une force de pression radiative exercée par les photons, d'une part, et la force de gravitation, d'autre part.

Cette compétition a engendré des ondes de pression, comparables aux ondes sonores, qui se propageaient dans l'Univers primordial à une fréquence et une vitesse déterminées. Lorsque la matière et la lumière ont fini par se découpler, ces ondes acoustiques ont joué un rôle déterminant dans la répartition de la densité de matière - la distance caractéristique entre chaque galaxie, en particulier.

En 2005, moment où ces ondes ont été détectées pour la première fois, il devenait alors possible de calculer la densité de matière par une nouvelle méthode expérimentale [4] . Par ailleurs, cette méthode était beaucoup moins entachée d'incertitudes que celle utilisant le fond diffus cosmologique. Là encore, les résultats démontraient que la matière ne remplissait qu'un quart de notre Univers. Ils ont convaincu les cosmologistes les plus réticents que nous vivions bien dans un Univers dominé par l'énergie noire, ces derniers n'ayant plus besoin de recourir aux supernovae pour parvenir à la même conclusion.

Mais quelle est la nature de ce constituant majeur de l'Univers ? La question reste, aujourd'hui, sans réponse... Car l'énergie noire n'émet pas de rayonnement. Elle ne peut donc être observée, et étudiée, de manière directe. De quoi, donc, s'occuper, pour les théoriciens qui cherchent à expliquer la nature de cette mystérieuse forme d'énergie.

Fluctuations du vide

Une théorie, perçue d'abord comme la plus prometteuse, a fait l'objet de travaux et d'une attention poussés. Elle décrit l'énergie noire comme une « constante cosmologique » qui, à l'aune d'une expansion accélérée de l'Univers, pourrait recouvrir plusieurs réalités physiques - non distinguables, à jamais, par les observations. Selon l'acceptation la plus répandue, cette constante correspondrait à la manifestation d'un phénomène quantique. Celui-ci repose sur l'existence, à l'échelle quantique, de fluctuations emplissant tout l'espace, même celui que l'on qualifie de « vide ». En permanence, ces fluctuations créent et provoquent l'annihilation de particules. Plus l'Univers et l'espace qu'il emplit s'étendent, plus ces particules sont nombreuses. Elles produiraient une densité et une pression constantes, celles de l'énergie noire, autrement dit.

Cette théorie souffre néanmoins d'un problème de taille. Car, selon les calculs des physiciens quantiques, l'énergie des fluctuations du vide serait (au minimum !) 1060 fois trop importante pour correspondre à l'énergie noire. Pour le moment, l'ajustement théorique nécessaire exclut ainsi cette solution. Un autre modèle doit être identifié, et pour cela, les candidats et les publications scientifiques ne manquent pas.

L'un de ces modèles a connu un certain succès entre 2004 et 2005. Il postule l'existence d'une nouvelle forme d'énergie qualifiée de « quintessence » par ses inventeurs, en référence à un concept utilisé dans l'Antiquité pour désigner l'« éther » - cinquième élément plus difficile à appréhender que l'air, la terre, l'eau et le feu [5] . L'Univers en serait rempli, et sa contribution à la densité expliquerait l'expansion accélérée. Contrairement aux tenants de la constante cosmologique, ceux de la quintessence décrivent l'énergie noire comme une entité dynamique, dont la densité et la pression varient en fonction du temps. Mais les paramètres de leurs modèles sont fixés de manière beaucoup trop arbitraire, alors que ceux-ci prédisent bien peu de chose.

Modifier la relativité

Une troisième classe d'interprétations, dont les racines sont anciennes, va jusqu'à mettre en question les équations d'Einstein : elles ne seraient plus exactes aux très grandes échelles considérées, comme José Santiago, du Fermilab, près de Chicago, et Jochen Weller,

de l'University College de Londres, tentaient encore de l'expliquer en 2006 [6] . Pour eux, la relation supposée entre l'expansion et son contenu ne serait, elle-même, plus valable. Toute modification de la relativité générale doit néanmoins rester compatible avec les nombreux tests réalisés à son sujet, dans le système solaire en particulier. Soit autant de contraintes qui limitent fortement les possibilités théoriques.

Évoquons enfin un quatrième axe de recherche : le plus audacieux, et paradoxalement le plus conservateur, puisqu'il ne suppose aucune modification des lois de la physique et aucune entité de nature exotique. L'origine de ces travaux remonte à une dizaine d'années, mais ils font l'objet d'un certain renouveau depuis 2007, sous l'impulsion

d'astrophysiciens tels que Thomas Buchert, de l'université de Lyon, et David Wiltshire, de l'université de Canterburry [7] .

Ils critiquent la relation établie entre le décalage spectral des objets astronomiques (notamment les supernovae) et leurs distances, qui elle-même est fondée sur l'hypothèse d'un univers homogène. Un mécanisme expliquant comment des inhomogénéités modifieraient la propagation de la lumière à très grande échelle a ainsi été proposé, mais la complexité des calculs et de l'univers qui en découle pousse à la prudence. La majorité des astrophysiciens considèrent que l'effet de ces inhomogénéités reste faible, et ils ne peuvent, en l'état, revenir sur l'existence de l'énergie noire.

Équation d'état

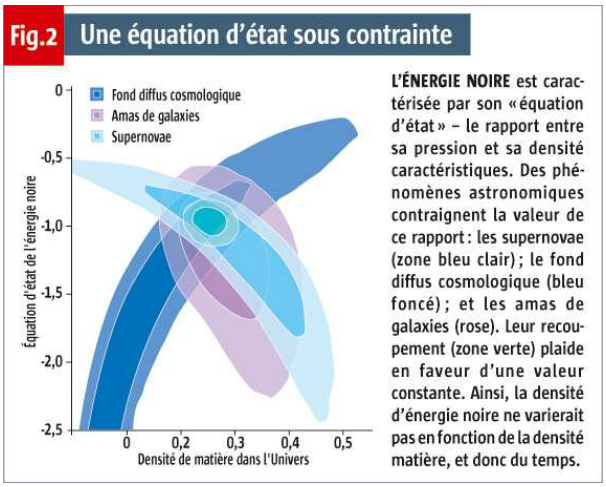
La quête pour la compréhension de l'énergie noire consiste essentiellement à éliminer certaines de ces hypothèses. Pour cela, les recherches se concentrent sur la détection d'une éventuelle variation, dans le temps, de la densité d'énergie noire. Elles visent à préciser son « équation d'état », relation décrivant le rapport entre la pression et la densité caractéristiques de cette entité [fig. 2] .

Les contraintes les plus précises sur cette équation d'état proviennent des données relatives aux distances de plus de 70 supernovae. Elles ont été obtenues grâce à une caméra « à grand champ », construite par le CEA, à Saclay, qui équipe le télescope de l'observatoire Canada-France-Hawaï, dans le Pacifique [8] . Ces données plaident en faveur d'une densité d'énergie noire de valeur constante. Mais une variation de cette densité exclurait, par exemple, l'existence d'une constante cosmologique, et elle renforcerait, de fait, les théories de la quintessence.

D'ambitieux programmes ont été lancés à cet effet. L'essentiel repose à nouveau sur l'observation de supernovae - en plus grand nombre (des dizaines, voire des centaines de milliers) et par des instruments plus précis (lire « La course aux observations », p. 42). Ils ne livreront leur verdict que dans six à sept ans. D'ici là, il est vraisemblable que nous continuerons à vivre avec l'idée que la majeure partie de l'Univers nous demeure totalement inconnue.

En deux mots Depuis la découverte de l'expansion de l'Univers, en 1929, les cosmologistes étaient persuadés que cette expansion décélérait en raison de l'attraction gravitationnelle. Plusieurs observations ont, au cours de la dernière décennie, mis fin à cette certitude : l'Univers se dilate à un rythme de plus en plus important, mû par une forme d'énergie totalement inconnue. Les théoriciens rivalisent, pour le moment sans succès, pour expliquer sa nature.

Franck Daninos,Pierre Astier et Reynald Pain



Franck Daninos,Pierre Astier et Reynald Pain

[1] A. Riess *et al., ApJ, 116,* 1009, 1998 ; S. Perlmutter *et al., ApJ, 517,* 565, 1999.

[2] P. de Bernardis *et al., Nature, 404,* 955, 2000.

[3] A. Benoit, « Deux techniques pour étudier la lumière fossile de l'Univers », *La Recherche,* , avril 2003, p. 8 ; G. Hinshaw *et al., Astrophysical Journal Supplement Series,* à paraître.

[4] D. Eisenstein *et al., Astrophys. J., 633,* 560, 2005.

[5] S. Fay, « Quintessence, le moteur cosmique », *La Recherche,* mars 2005, p. 30.

[6] O. Mena *et al., Phys. Rev. Lett., 96,* 041103, 2006.

[7] T. Buchert, *Gen. Rel. Grav. 40, 467, 2008 ;* D. Wiltshire, *New J. Phys., 9,* 377, 2007.

[8] P. Astier *et al. A&A, 447,* 31, 2006.

Observation : Autopsie d'une supernova

Les supernovae de type « Ia » résultent de l'explosion thermonucléaire d'une étoile, après que celle-ci a arraché une grande quantité de matière à une étoile voisine, ou à la suite d'une collision stellaire. Il s'agit de phénomènes rares, puisqu'ils se produisent au rythme moyen de trois fois par millénaire et par galaxie.

Ces étoiles explosent lorsqu'elles atteignent la même masse critique. Elles libèrent donc la même quantité d'énergie. Leurs rayonnements sont similaires, et elles émettent la même luminosité, très forte au demeurant. Il arrive en effet que, pendant plusieurs semaines, ces supernovae apparaissent plus brillantes que la galaxie qui les héberge. C'est pourquoi, dans notre galaxie, on peut les observer à l'oeil nu - parfois en plein jour - et qu'à l'aide de télescopes il est possible de détecter des étoiles ayant explosé durant la première moitié de l'âge de l'Univers.

En comparant la luminosité intrinsèque et apparente de ces supernovae,

et en analysant leurs spectres d'émission, on peut déterminer l'accélération qu'elles subissent. C'est de cette manière que l'accélération de l'expansion de l'Univers a été mise en évidence, et avec elle, l'existence de l'énergie noire.