

ARTICLE DE FOND

Le côté obscur de l'Univers

Alexandre Arbey, Observatoire de Lyon

Résumé : *Matière noire et énergie noire représentent actuellement la quasi-totalité de l'énergie contenue dans l'Univers et nos connaissances à leur sujet sont très réduites. Aussi, la compréhension et la détection de la matière noire et de l'énergie noire constituent actuellement deux enjeux majeurs de la cosmologie.*

Un peu d'histoire...

La question de l'existence de la matière noire est un problème relativement ancien, puisqu'elle a été évoquée pour la première fois en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky. En effet, il étudiait à cette époque un groupe de sept galaxies de l'amas de Coma, et souhaitait comparer la « masse lumineuse » de l'amas, qu'il pouvait déduire de la quantité de lumière émise par cet amas, à la « masse dynamique » de l'amas, calculable à l'aide de la dynamique observée des composantes de l'amas et des lois de Newton. Ce faisant, il remarqua que la masse dynamique apparaissait comme quatre cents fois plus grande que la masse lumineuse. La question de cette différence de masse a été soulevée à nouveau seulement une quarantaine d'années plus tard, dans les années 1970. L'astronome américaine Vera Rubin étudia la rotation des galaxies spirales, et pu ainsi en déduire la masse dynamique, qui apparaissait là aussi beaucoup plus grande que la masse lumineuse. C'est à partir de ce moment-là que l'on nomme cette matière non-lumineuse et indétectable « matière noire » ou encore « matière sombre ». Les études qui ont suivi ont confirmé la présence du problème de la matière noire dans les galaxies et dans les amas.

Le problème de l'énergie noire est à la fois une question théorique discutée peu de temps après l'apparition de la relativité générale, et un problème nouveau. Dans les années 1920, pour des raisons philosophiques, Albert Einstein pensait que l'Univers devait être statique. Or, les équations de la relativité générale semblaient indiquer que l'Univers devait être en expansion. Einstein proposa alors d'introduire un nouveau terme dans ses équations, basé sur une nouvelle constante gravitationnelle, la constante cosmologique.

Quelques années plus tard, Edwin Hubble a pu montrer en 1929 en étudiant la vitesse d'éloignement de galaxies lointaines que l'Univers n'est pas statique, mais en expansion. C'est ainsi que l'idée d'une constante cosmologique a été abandonnée pendant longtemps. Cependant, dans les années 1990, des mesures très précises de supernovæ distantes et du fond de rayonnement cosmologique ont montré que le taux d'expansion de l'Univers ne peut pas être expliqué sans la présence d'une « énergie noire » (ou « énergie sombre ») accélérant l'expansion de l'Univers, et la constante cosmologique proposée initialement par Einstein peut alors apparaître comme un modèle possible d'énergie noire.

Equivalence Matière-Energie

La Relativité Restreinte proposée par Albert Einstein en 1905 nous indique qu'il n'existe pas de distinction entre matière et énergie. En effet, la matière peut apparaître comme une sorte de cristallisation de l'énergie, alors que la lumière en serait une autre forme. La formule très connue $E=mc^2$ indique clairement que la masse est proportionnelle à l'énergie. La physique des particules est basée sur ce principe, et les expériences ont clairement montré que des particules de matière (fermions) telles que des protons ou des électrons peuvent être converties en particules intermédiaires (bosons) telles que des photons.

Mise en évidence

De nombreuses observations permettent d'étayer la thèse de la présence de matière noire et d'énergie noire, et concernent les objets astronomiques de grandes tailles.

Les galaxies

C'est à cette échelle que les observations sont les plus probantes. En effet, il semble que la plupart des galaxies ont une masse dynamique qui serait près de dix fois plus grande que la masse visible.

Intéressons-nous au cas simple des galaxies spirales. Si l'on observe une étoile tournant autour du centre galactique, en utilisant les lois de Newton, on peut montrer que sa vitesse orbitale est proportionnelle à la racine carrée de la masse contenue à l'intérieur de l'orbite M , et inversement proportionnelle à la distance au centre R :

$$v_{orb} = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

L'avantage des galaxies spirales est que la mesure de vitesses de rotation en fonction du rayon de la trajectoire des étoiles en rotation autour du centre galactique est relativement aisée.

Si l'on observe la rotation d'une étoile autour du centre galactique et qu'on peut en mesurer la vitesse, il est possible d'inverser la relation précédente pour déterminer la masse contenue à l'intérieur de la trajectoire :

$$M(R) = \frac{R v_{orb}^2}{G}$$

Si l'on s'intéresse à la rotation des étoiles les plus éloignées du centre galactique, les mesures semblent indiquer que leurs vitesses restent constantes au-delà d'un certain rayon, et on parle alors de « courbes de rotation plates ». En utilisant la formule précédente, on peut donc en déduire que la masse dynamique augmente avec le rayon. Concernant la matière visible, on s'attend au contraire, que la masse lumineuse reste pratiquement constante au-delà d'un certain rayon, que l'on appellera rayon lumineux, qui correspond en pratique à la limite extrême de la galaxie telle qu'elle nous apparaît visuellement. C'est cette différence de comportement qui confirme l'existence de « matière noire » même à longue distance du centre galactique. On pourra se reporter à la figure 1 pour avoir une autre vision de la différence entre matière visible et matière dynamique en fonction des vitesses de rotation. On estime que cette matière noire pourrait s'étendre jusqu'à une centaine de kiloparsecs dans un halo sphérique qui entourerait les galaxies, tandis que le disque de matière visible s'étend au plus jusqu'à quelques dizaines de kiloparsecs.

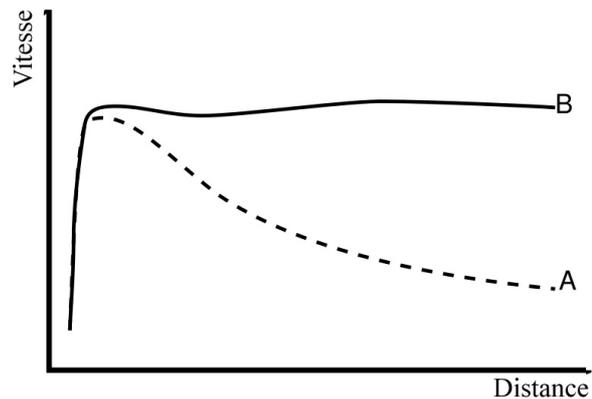


Figure 1 : Courbe de rotation typique pour une galaxie spirale. La courbe en trait plein correspond à des vitesses observées, tandis que la courbe en trait pointillé est la courbe qui devrait être observée si seule la matière visible était présente. (wikipedia)

Les amas galactiques¹

Les amas galactiques sont des groupements de galaxies en interaction gravitationnelle. Les études de ces amas galactiques ont montré qu'ils recèlent aussi une quantité importante de matière noire. Deux méthodes différentes ont permis de confirmer ce résultat.

La première méthode est encore une méthode dynamique. Les amas sont en effet composés de galaxies, mais aussi d'une quantité importante de gaz intergalactique. Sous l'influence de l'interaction gravitationnelle avec les galaxies proches, ce gaz va être fortement échauffé, et va émettre un rayonnement X important et détectable (voir figure 2). La masse visible de l'amas va donc contenir la masse des galaxies ainsi que la masse du gaz. L'étude du rayonnement X va permettre de connaître la température du gaz qui l'a émis, et cette température est en rapport avec l'interaction gravitationnelle qui s'exerce sur le gaz. Comme l'interaction gravitationnelle est provoquée par la masse, il va ainsi être finalement possible de trouver la masse totale de l'amas. En comparant cette masse totale à la masse visible de l'amas estimée à l'aide de méthodes observationnelles plus directes, cette méthode a révélé que seule 10 % de la masse totale serait visible. Le principal défaut de cette méthode est qu'elle reste très liée aux paramètres de modélisation de l'amas et du gaz chaud.

¹ NdIR : On appelle parfois "amas galactiques" les amas constitués d'étoiles et appartenant à notre Galaxie. Ici, le terme "amas galactiques" est employé dans le sens "amas de galaxies".



Figure 2 : Amas galactique lointain RDCS 1252.9-2927 vu par le satellite CHANDRA. Les globules violets correspondent au rayonnement X et permettent de voir l'emplacement du gaz chaud. (NASA/Chandra)

Une seconde méthode a donc été développée, et a l'avantage de ne pas souffrir des défauts de la première. Il s'agit d'une méthode basée sur les « effets de lentille gravitationnelle », qui sont des conséquences de la relativité générale. La relativité générale nous apprend que la présence de masse courbe la trajectoire de la lumière. La courbure peut se faire de la manière décrite sur la figure 3. Il est possible d'observer sur Terre une galaxie située derrière un amas galactique, car l'amas ayant une masse très importante va fortement courber les rayons lumineux provenant de la galaxie, qui vont donc pouvoir contourner l'amas. Cependant, la forme apparente de la galaxie va être modifiée, mais en analysant statistiquement cette forme apparente, c'est-à-dire en comparant cette forme apparente à celles de galaxies standards, il va être possible de reconstituer le trajet de la lumière, et en particulier son rayon de courbure. A partir des équations d'Einstein, il sera ensuite possible de déterminer la masse qui a provoqué cette courbure de la trajectoire lumineuse. Ainsi, cette méthode permet de déterminer la masse dynamique des amas avec un nombre relativement réduit de paramètres, et ainsi de confirmer les résultats de l'étude du rayonnement X du gaz chaud.

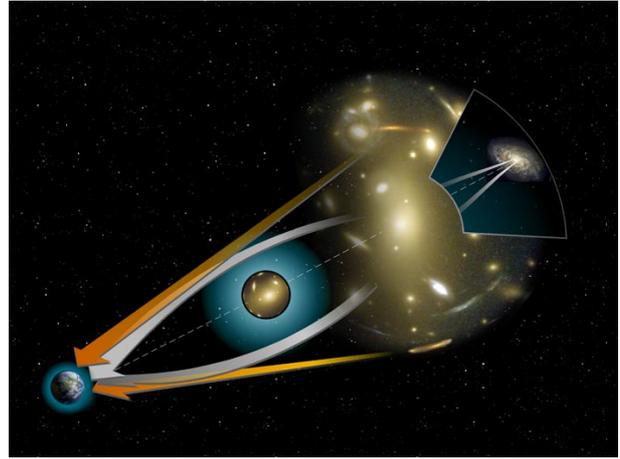


Figure 3 : L'amas galactique (au centre de l'image) dévie par effet gravitationnel les rayons lumineux provenant de la galaxie située derrière lui, et la rend ainsi visible sur Terre. (wikipedia)

Les supernovæ de type Ia

Les supernovæ sont des objets astronomiques très importants, car leur grande luminosité leur permet d'être visibles même à très grande distance. Lorsque ces distances sont extrêmement grandes, la lumière qui nous en arrive a subi l'expansion de l'Univers, ce qui se traduit par un rougissement de cette lumière, et une augmentation de la magnitude apparente de la supernova. Si l'on est capable de connaître aussi la luminosité de la supernova, on va pouvoir déduire, de la comparaison entre magnitude apparente et magnitude absolue, une « distance de luminosité ». Or, les modèles cosmologiques théoriques permettent de calculer cette distance de luminosité à partir de la quantité de matière noire et d'énergie noire dans l'Univers, en fonction du décalage vers le rouge de la lumière. Si le décalage vers le rouge est facilement mesurable, il n'en est pas de même pour la luminosité. Heureusement, les supernovæ « de type Ia », provenant de l'explosion d'une naine blanche ayant atteint la masse de Chandrasekhar par accréation de la masse d'une étoile compagne, forment une classe relativement homogène, et en première approximation, ces supernovæ peuvent être considérées comme des « chandelles standards », c'est-à-dire comme une luminosité quasiment identique pour toutes ces supernovæ. De cette manière, on peut obtenir les informations nécessaires pour pouvoir utiliser les prédictions théoriques. Ainsi, les données actuelles montrent que l'Univers doit contenir environ 70 % d'énergie noire, le reste étant de la matière ou du rayonnement, et que l'expansion de l'Univers n'est pas en train de ralentir.

Autres observations cosmologiques

D'autres études cosmologiques permettent de confirmer les résultats précédents.

On notera en particulier que le fond diffus cosmologique apporte de nombreuses informations sur le contenu énergétique de l'Univers. En pratique, le fond diffus cosmologique est le nom que l'on donne à l'ensemble de la lumière qui a été émise lorsque les premiers atomes se sont formés. Il s'agit donc d'une lumière qui a traversé l'Univers durant des milliards d'années avant de nous parvenir, et pour cette raison on la nomme parfois « rayonnement fossile ». Ce rayonnement provient de toutes les directions, et nous apporte en quelque sorte une image de l'Univers tel qu'il était au moment de cette formation d'atomes. Son étude nous a appris que le fond de rayonnement est très homogène et correspond à une température de 3 K. Il a été mis en évidence par hasard en 1964 par les radioastronomes Penzias et Wilson. Les études qui ont suivi cette découverte ont permis de mettre en évidence de petites fluctuations dans ce rayonnement (voir figure 4).

La répartition, la forme et la taille des fluctuations peuvent être modélisées, et les quantités de matière et d'énergie noires en sont des paramètres importants. Aussi, la comparaison entre les fonds diffus simulés et le fond diffus observé a pu permettre d'imposer des contraintes importantes sur les paramètres cosmologiques et de confirmer les observations précédentes. En particulier, ces études ont montré que l'Univers est globalement plat, et que l'énergie noire représente près de 70 % de l'énergie totale dans l'Univers, les atomes moins de 5 %, et la matière exotique (c'est-à-dire non composée d'atomes), près de 25 %.

Une autre manière de confirmer ces résultats est de considérer la répartition des grandes structures dans l'Univers, c'est-à-dire des galaxies et des amas de galaxies.

Là encore, des cartes de la répartition des structures dans l'Univers peuvent être établies, et comparées à des cartes virtuelles provenant de simulations cosmologiques modélisant la formation des structures en fonction de différents paramètres. Les contraintes obtenues à partir de ce genre de simulations permettent tout à fait de confirmer les résultats précédents.

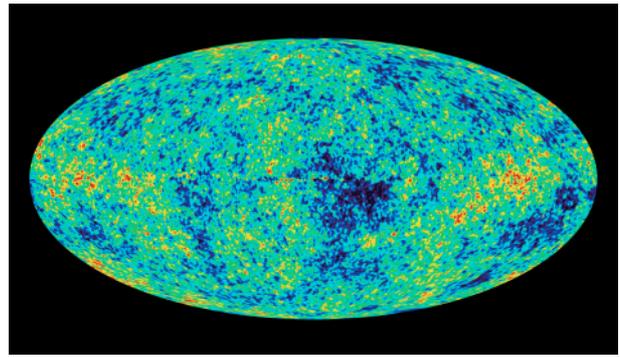


Figure 4 : Fluctuations dans le fond diffus cosmologique telles qu'observées par le satellite WMAP. (NASA/WMAP)

La nature de la matière noire et de l'énergie noire

Même si aucune détection directe de la matière ou de l'énergie noires n'a pour le moment abouti, les études ont néanmoins permis d'obtenir des connaissances sur le comportement de ces composantes sombres, et des modèles possibles ont émergé.

Description

La matière noire tout d'abord a comme caractéristique principale de réagir comme de la matière, c'est-à-dire d'avoir une pression faible et un comportement gravitationnel dominé par sa masse, tout en étant en très faible interaction avec le milieu environnant (sans quoi cette matière noire aurait déjà pu être mise en évidence). Des études cosmologiques détaillées ont permis cependant de faire la distinction entre matière noire « normale », composée de baryons (et en particulier d'atomes) et dont les gaz sont soumis aux lois de l'hydrodynamique, et matière noire « exotique » composée de particules non-baryoniques. Cette matière noire exotique représenterait la majorité de la matière noire dans l'Univers.

L'énergie noire apparaît comme une composante beaucoup plus exotique. En effet, la pression de cette énergie serait aujourd'hui extrêmement élevée, et sa caractéristique principale est d'être négative, et de n'avoir un effet qu'à des échelles extrêmement grandes. Alors que la matière noire tend à obliger l'Univers à se contracter sous l'effet de la gravitation, la pression négative de l'énergie noire va l'obliger à s'agrandir en accélérant. Cet effet qui peut paraître très étrange rappelle cependant le comportement du « vide » de la physique des

particules, et c'est pour cette raison que l'on peut aussi l'appeler « énergie du vide ».

Noires ?

L'adjectif « noir » que l'on associe à matière noire ou énergie noire n'est bien entendu pas en rapport avec une couleur effective de ces composants. C'est en pratique un abus de langage, car il serait préférable de les qualifier d'invisibles ou encore indétectables. La caractéristique principale de ces composantes est d'interagir très faiblement avec les particules ordinaires, et en tant que tel, de ne réfléchir ou de ne produire aucune lumière.

Modélisations

Différents modèles théoriques essaient d'expliquer la nature de la matière noire et de l'énergie noire.

Concernant la matière noire baryonique, c'est-à-dire composée d'atomes, des études ont montré que des gaz très froids ou des objets peu lumineux tels que des naines brunes ou des trous noirs peuvent être extrêmement difficiles à détecter, et ainsi être d'importants constituants de la matière noire baryonique, et on pense n'être actuellement capable que de mettre en évidence 10 % de cette matière noire baryonique.

Le plus gros problème est de comprendre de quoi peut être composée la matière noire non-baryonique. En effet, les simulations cosmologiques montrent que les neutrinos, que nous savons désormais massifs, peuvent au plus constituer 15 % de la matière noire non-baryonique, et le modèle standard de la physique des particules ne propose pas d'autre particule correspondant à cette matière noire non-baryonique. L'explication la plus d'actualité est de considérer que la matière noire non-baryonique est constituée de particules exotiques qui n'ont encore jamais été découvertes, et certains modèles de physique des particules tels que la supersymétrie ou le modèle des axions en proposent l'existence. La prochaine mise en marche du collisionneur LHC (Large Hadron Collider) au CERN pourrait apporter une réponse dans les années à venir.

Concernant l'énergie noire, le problème est plus complexe. Einstein avait proposé dans le passé l'existence d'une constante cosmologique qui pourrait éventuellement modifier la dynamique de l'Univers. Son idée a été plus récemment réutilisée dans un contexte différent : les comportements observés de l'énergie noire pourraient être expliqués

en ajoutant simplement une nouvelle constante à la physique connue, la constante cosmologique. Cependant, des problèmes théoriques sont apparus depuis lors, et cette explication n'est plus aussi convaincante. Une réponse théorique serait que l'énergie noire pourrait être une manifestation de l'énergie du vide de la physique des particules, mais les calculs révèlent que cette énergie du vide de la physique des particules est d'un ordre de grandeur très différent de l'énergie noire cosmologique, et ne peut donc pas l'expliquer. A cause de cela, l'énergie noire reste très mystérieuse et énigmatique.

D'autres modèles sont aussi apparus, avec des conceptions fondamentalement différentes. L'idée de base de ces modèles est que notre manière d'effectuer nos calculs peut être fautive (en particulier pour l'énergie du vide de la physique des particules), ou que nos équations de départ sont fausses. Ainsi, les problèmes de la matière et de l'énergie noires pourraient être en réalité de faux problèmes. Cette idée est étayée par le fait que nous n'avons encore pas pu comprendre comment lier et réconcilier l'interaction gravitationnelle avec les effets quantiques. En particulier, les théories des cordes ont pour but d'unifier des différentes interactions de la Nature dans une théorie unique, et pourraient éventuellement expliquer la nature de l'énergie noire. D'autres modèles, tels que MOND (MODified Newtonian Dynamics) ou les théories tenseur-scalaire, proposent de modifier les équations d'Einstein de la relativité générale, de manière à ce que les lois de gravitation aux grandes échelles, c'est-à-dire à l'échelle des galaxies ou plus, soient différentes et puissent expliquer le comportement dynamique observé à ces échelles.

Conclusion

Matière noire et énergie noire représentent deux des problèmes les plus importants de la cosmologie actuelle. Si étudiées, elles restent pourtant deux questions énigmatiques, mais nous pouvons espérer dans les années à venir qu'il sera possible de mieux les comprendre et éventuellement de les détecter de manière plus directe.

■