



ENERGIE SOMBRE ET MATIERE NOIRE

JP. Maratrey - Janvier 2007

Les théories dont il est question sont encore controversées. Tous les spécialistes n'en sont pas convaincus, même s'ils sont de plus en plus nombreux à y adhérer.

Beaucoup de recherches sont en cours sur ce sujet.

J'emploierais le présent pour la facilité du texte, mais il faut le comprendre au conditionnel.

L'énergie sombre et la matière noire (ne pas confondre ces deux notions) sont des constituants majoritaires de l'univers. La matière visible et l'énergie telle que nous les connaissons sont des composants minoritaires.

Nous verrons comment elles sont apparues indirectement aux chercheurs. Nous étudierons ensuite les caractéristiques de l'énergie sombre et de la matière noire, puis les tâtonnements et tentatives d'explication de ces phénomènes. Enfin, quelques théories alternatives compléteront ce dossier.

Energie

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est nécessaire d'explicitier le concept d'énergie.

Quelques définitions :

Petit Larousse : Grandeur caractérisant un système, et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction.

Dictionnaire de l'Académie Française : Capacité qu'a un corps, un système, à produire un travail.

Mediadico : Capacité d'un corps ou d'un système à modifier l'état autres systèmes. Forme sous laquelle se manifeste cette capacité

Planète énergie : L'énergie caractérise la capacité à produire des actions, par exemple à engendrer du mouvement, modifier la température d'un corps ou à transformer la matière.

Dans le sens commun, l'énergie désigne donc tout ce qui permet d'effectuer un travail, de produire de la chaleur, de créer de la lumière, de modifier des espèces chimiques, de générer du mouvement.

L'énergie est donc une grandeur physique, numérique, qui n'a pas de caractère général, car associée à une situation concrète. Ce n'est ni une fluide, ni une substance. On parle d'énergie de mouvement, d'énergie électrique, d'énergie chimique, d'énergie thermique, d'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique, d'énergie éolienne...

En physique, l'énergie est une grandeur scalaire (uniquement définie par sa mesure) dont l'unité internationale est le Joule (des kilogrammes mètres carrés par seconde et par seconde).

L'énergie peut se transformer. Un bon exemple est le moteur de voiture. Il utilise de l'énergie chimique, la combustion d'un hydrocarbure. La combustion produit de la chaleur (énergie thermique), de la lumière (énergie lumineuse) et un gaz qui lui-même augmente la pression dans le cylindre. La pression est transformée en mouvement de rotation des roues au travers d'un système de transmission d'énergie mécanique, et en énergie électrique via l'alternateur. Au passage, des frottements produiront un échauffement et une usure. Le bilan énergétique global du système (le moteur à explosion) devra tenir compte de tous ces éléments.

A noter que dans un système fermé, l'énergie se conserve. Il n'y a aucune perte ni aucune création. Dans l'exemple du moteur à explosion, l'énergie chimique devient chaleur, pression, lumière, électricité, vitesse...

Les énergies, selon leur nature s'expriment aussi dans différentes unité : le watt-heure (Wh) pour l'électricité, la calorie (cal) pour l'énergie thermique, l'électron-volt (eV) pour le nucléaire... Si les Wh ne peuvent pas s'additionner avec des calories, leurs équivalents en Joules s'additionnent pour évaluer les bilans énergétiques.

Mathématiquement, l'énergie a également plusieurs formes :

$E = \frac{1}{2} mv^2$	Energie de mouvement
$E = hv$	Energie lumineuse
$E = mc^2$	Energie nucléaire
...	

L'énergie est une notion difficile à saisir, au vu de ses différentes formes. En résumé, l'énergie est « quelque chose » qui se conserve. Peut se transformer, mais se conserve.

1^{er} principe de la thermodynamique : l'énergie existe, la preuve, c'est qu'on la paie (boutade).

Energie sombre

Les équations d'Einstein, celles de la relativité générale, décrivent le comportement de l'espace-temps en fonction de son contenu – masse / énergie.

Pour résumer, un objet pesant (une étoile, une galaxie...) déforme les dimensions de l'espace et du temps. Ces quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) sont inséparables dans cette théorie.

Héritier de deux mille ans de croyance en un univers statique, immuable, éternel, Einstein introduisit dans ses équations une constante qu'il appela « constante cosmologique », afin de rendre l'univers statique. Mais les premières solutions ces équations indiquaient que l'univers statique était instable ou vide.

Dans les années 1920, Edwin Hubble démontra que l'univers était en expansion, et Einstein reconnut son erreur en supprimant sa constante cosmologique.

Récemment, des études sur les supernovas lointaines ont montré que l'expansion de l'univers n'est pas constante. Elle varie avec le temps. Et depuis plusieurs milliards d'années, elle semble s'accélérer. Ce fait est en contradiction avec un contenu de l'univers dominé par la matière ordinaire (étoiles, galaxies, amas de galaxies...). Elle devrait au contraire se ralentir, la gravitation agissant comme une force d'attraction (la matière attire la matière).

Ce fait d'observation, confirmé, peut être expliqué par la présence de l'énergie sombre, une énergie de nature répulsive (et encore hypothétique) qui tend à accélérer l'expansion de l'univers, alors qu'un univers dominé par la matière aurait tendance à ralentir l'expansion.

Des considérations sur la géométrie générale de l'univers amènent les spécialistes à penser que cette énergie sombre constitue 70 % de l'énergie totale de l'univers.

La nature de cette énergie sombre est totalement inconnue et reste très spéculative.

L'hypothèse la plus communément admise est que l'énergie sombre provient de l'énergie du vide, représentée par la constante cosmologique. Actuellement la plus simple, cette explication implique que la densité d'énergie sombre est constante et uniforme dans tout l'univers, invariable dans le temps. Ce serait une caractéristique fondamentale de l'univers.

L'autre hypothèse qui circule consiste à attribuer le pouvoir de l'énergie sombre à des particules encore inconnues.

La théorie de l'inflation explique la formation de grandes structures comme les galaxies et les amas de galaxies, ainsi que l'isotropie (uniformité dans toutes les directions) de l'univers à grande échelle. Elle aurait eu lieu au tout début de l'univers, une minuscule fraction de seconde après sa naissance, juste après le big-bang. Dans ce contexte, la présence de l'énergie sombre pourrait expliquer pourquoi l'inflation a eu lieu. Elle en serait la cause. On ne sait pas si l'énergie sombre ayant provoqué l'inflation est la même que celle envisagée aujourd'hui.

Plusieurs hypothèses sont émises quant au devenir de l'univers tenant compte de la variabilité éventuelle de la densité d'énergie sombre.

- Si l'énergie sombre continue à dominer, même si sa densité n'augmente pas, l'expansion va s'accélérer jusqu'à devenir exponentielle. Les grandes structures vont se briser. Les amas de galaxies se séparer, les galaxies s'éloigner. Nous verrons les galaxies s'éloigner de plus en plus vite de nous.

- Si la densité d'énergie sombre augmente dans le temps, alors les galaxies se déliteront, ainsi que le système solaire, et toute la matière de l'univers, jusqu'à la désintégration des atomes, laissant un univers vide de la moindre structure. Ce scénario est appelé Big-rip (la grande déchirure).
- Si la densité d'énergie sombre décroît, la matière pourrait reprendre le dessus, freiner l'expansion, et finalement l'inverser. Les galaxies se rapprocheraient alors, l'univers se contractant jusqu'au Big-crunch (le grand écrasement).

Ce dernier scénario est le moins probable.

Les recherches sur les supernovas semblent indiquer que l'expansion a commencé à accélérer il y a six milliards d'années, et que son rythme reste constant, ou varie très peu. Cela est compatible avec l'existence d'une constante cosmologique faible et constante, et rend improbables le Big-crunch et le Big-rip.

Matière noire

La matière noire est de la matière apparemment indétectable optiquement, quelle que soit la longueur d'onde utilisée.

Histoire

L'origine de cette hypothèse remonte à 1933 lors de l'étude par Fritz Zwicky de l'amas Coma. Son but était de comparer les masses des galaxies par deux moyens différents : d'une part la masse « lumineuse » déduite de la quantité de lumière émise par les galaxies, et d'autre part la masse « dynamique » déduite de la mesure des vitesses, et en appliquant les équations de Newton.

Il trouva dans l'amas Coma une masse dynamique 400 fois plus élevée que la masse lumineuse !

Comme beaucoup d'incertitudes étaient à l'époque associées à ces mesures, les collègues de Zwicky ne s'y intéressèrent pas, et la découverte resta dans l'ombre.

En 1936, Sinclair Smith trouva un résultat semblable avec l'étude de l'amas de la Vierge. Il trouva un rapport de 200. Mais les astronomes avaient mieux à faire avec la nouvelle théorie de l'expansion de l'univers, et les deux malheureux découvreurs furent oubliés.

Mise en place de la théorie

La matière noire refait surface dans les années 70. D'autres astrophysicien(ne)s reprennent le flambeau. En particulier, Vera Rubin étudie la rotation des galaxies spirales, plus spécialement celle d'Andromède. Le problème est identique aux amas de galaxies. Il s'agit de comparer la masse issue des étoiles de la galaxie à la masse déduite par l'application des lois de Newton sur les vitesses des étoiles.

Puisque la masse dynamique est celle issue des effets de la gravitation, c'est la seule valable, la vraie, la seule qui tienne compte de toute la matière composant la galaxie. Ici, nous postulons que toute matière est soumise aux lois de la gravitation universelle.

Calculer la masse lumineuse revient à compter les étoiles. Ces dernières rayonnent, et si l'on peut connaître leurs caractéristiques et leur nombre, la lumière qui en est issue est un bon traceur la masse de la galaxie. Selon les galaxies, Rubin trouva que la masse dynamique est de 10 fois la masse visible d'une galaxie.

En fait, Vera Rubin constata que la courbe de rotation des galaxies ne correspond pas à ce que l'on attend. En particulier, les étoiles de la périphérie de la galaxie tournent trop vite. Elles devraient être éjectées... Or, l'observation montre le contraire.

Une bonne hypothèse est de considérer la présence d'un halo de matière invisible entourant la galaxie et atteignant 90% de la masse totale réelle de la galaxie !

Une galaxie serait donc composée d'étoiles dans un disque central, et d'un halo sphérique invisible qui augmente considérablement sa masse, mais aussi ses dimensions. Ce halo serait dense au centre, allant en diminuant vers la périphérie. Pour la Voie Lactée, sa taille est estimée entre 600 000 et 1 000 000 al (le Soleil est à 28 000 al du centre).

Les halos de certaines galaxies proches, comme Andromède ou la Galaxie du triangle, peuvent avoir des recouvrements, des parties communes de cette matière noire.

Des études récentes montrent que le même phénomène se produit dans les amas de galaxies. Les amas seraient entourés de halos de matière noire. Si la masse dynamique des galaxies est 10 fois supérieure à leur masse lumineuse, ce rapport passerait à 30 fois dans les amas de galaxies.

Une autre étude, menée par Yannick Mellier, débutée en 1996 et terminée en 2000 a consisté à réaliser une ébauche de carte de matière noire à très grande échelle, sur tout l'univers observable. La méthode est statistique, et les mesures d'origine sont réalisées sur une surface du ciel comparable à celle de la Lune. Dans cette simulation, la matière noire se présente sous forme de longs filaments qui s'entrecroisent, donnant le même type de structure que la matière visible.

Une autre étude plus précise, sur une surface du ciel 20 fois plus grande, devrait dans un avenir proche donner des résultats plus précis, avec une carte de matière noire plus détaillée.

L'observation montre à l'heure actuelle que l'univers est plat ou proche d'être plat. Qu'il n'a pas ou très peu de courbure. Pour arriver à ce résultat, il faut que la masse de l'univers soit égale à une « masse critique » calculée théoriquement avec les équations de la relativité d'Einstein.

La masse dynamique de l'univers représenterait selon cette étude un tiers de cette masse critique. Le reste étant composé d'énergie sombre.

Nature de la matière noire

Les deux grandes théories qui s'affrontent sur la nature de la matière noire reposent sur la masse et la vitesse des particules les composant.

- Dans le cas de particules légères et dont la vitesse est proche de celle de la lumière, on parle de matière noire chaude (voir les neutrinos).
- Dans le cas de particules plus lourdes, et par conséquent plus lentes, on parle de matière noire froide (voir les MACHO et WIMP).

Là intervient la grande question de l'œuf et de la poule. Pardon, de la formation en premier des galaxies ou des étoiles.

Dans le cas d'un univers dominé par de la matière noire chaude, la vitesse des particules empêche la formation de petites structures. Les amas de galaxies se forment d'abord, en se fractionnant ensuite.

Dans le cas d'une domination de la matière noire froide, c'est le contraire, les particules vont pouvoir s'agglomérer sur des (relativement) petites distances en créant d'abord les étoiles, puis les galaxies, et enfin les amas et super amas de galaxies.

L'étude des stabilités comparées des galaxies et des amas de galaxies semble montrer que présence de la matière noire froide devrait être majoritaire (les galaxies sont plus stables que les amas de galaxies).

Nuages de gaz, MACHOS

La première idée qui vient est de s'intéresser aux objets non détectables car lointains comme les nuages de gaz et de poussières et les MACHO, MAAssive Compact Halo Objects comprenant les naines blanches, les naines brunes et les trous noirs (astres morts).

Les nuages sont composés majoritairement d'hydrogène, élément trop léger pour combler la différence entre masse dynamique et masse lumineuse. La masse lumineuse est au mieux multipliée par deux, laissant encore un facteur 5 inconnu.

Quant aux MACHO, il en faudrait 10 fois plus que d'étoiles vivantes pour expliquer la matière noire. De plus, en observant les galaxies lointaines, donc plus jeunes, on devrait voir ces astres encore vivants, et donc les galaxies plus brillantes, ce qui n'est pas le cas. Les proportions de supernovas devraient également être plus importantes que ce qui est observé.

Les naines brunes sont trop peu lumineuses pour être détectées dans les autres galaxies que la nôtre. Un moyen indirect est de s'appuyer sur les effets de lentille gravitationnelles (effet grossissant lorsqu'une naine brune passe exactement dans la ligne de visée d'un objet plus lointain). Ici encore, les effets de lentille détectés par les études sont beaucoup trop peu nombreux.

Les trous noirs sont aussi trop peu nombreux pour espérer expliquer cette matière noire. Il faudrait par exemple un million de trous noirs supermassifs comme celui du centre de la voie Lactée pour combler le manque de matière de notre Galaxie. Nous n'observons pas ceci, ni les phénomènes associés comme la perturbation des étoiles passant à proximité.

Les neutrinos

Le neutrino est une particule élémentaire qui interagit extrêmement peu avec les autres particules, en particulier la matière ordinaire (neutrons, protons, électrons).

On estime que sa masse est très faible, mais comme c'est la particule la plus abondante de l'univers après le photon, il était un bon candidat pour la matière noire.

Au mieux, les neutrinos représentent 18% de la matière totale de l'univers.

Les WIMP

Weakly Interactive Massive Particles.

Ce sont des particules qui, comme le neutrino interagissent très peu avec ses congénères, mais ont une masse importante.

L'hypothèse des WIMP pour la matière noire est à l'étude. Elle fait intervenir des théories en pointe de la physique des particules comme la supersymétrie. (Nous attendrons que ces théories soient à notre portée intellectuelle pour en parler...).

Et des particules inconnues

Reste la possibilité de la présence dans l'univers de particules inconnues qui pourraient expliquer le manque de matière. C'est une voie explorée, mais qui reste très spéculative, on s'en doute...

Pour résumer

L'univers serait composé d'environ :

- Energie sombre 67 %
- Matière visible 3 %
- Matière noire 30 % dont
 - Nuages de gaz et poussières < 3 %
 - MACHO < 3 %
 - Neutrinos < 6 %
 - Inconnus et WIMP > 18 %

La matière noire de l'univers représente ainsi plus de 90 % de son contenu en matière !

Et si la matière noire n'existait pas ?

C'est l'avis de certains d'astrophysiciens. Ils pensent que, plutôt que de chercher de la matière inobservable, hypothétique, il serait plus judicieux de revoir certaines lois de la physique.

Selon l'astronome israélien Mordehai Milgrom, sa théorie nommée MOND (Modified Newtonian Dynamics) modifierait les équations de Newton établissant les lois de la gravitation. Celles-ci seraient valables sur des distances relativement faibles, mais fausses à plus grande échelle, lorsque l'accélération devient très faible (de même que les lois de Newton ne sont justes qu'à des vitesses faibles et devant des masses faibles).

L'intensité de la force de gravitation décroîtrait moins vite qu'on ne le pense avec la distance. Elle serait donc plus importante aux grandes distances et rendrait la présence de matière noire inutile.

Mathématiquement, la force de gravitation serait, pour les faibles accélérations ($< 10^{-10}$ m/s²), une loi en $1/r$ et non une loi en $1/r^2$ comme c'est le cas avec la loi de Newton classique.

Pour la petite histoire, la limite entre les deux lois serait une constante fondamentale de la nature, et Milgrom a été surpris de constater que sa valeur approchait cH .

La théorie des cordes n'est pas en reste et propose également sa solution à l'énigme de la matière noire. En effet, selon cette théorie, la matière noire et l'énergie sombre seraient présents dans les dimensions cachées. Elles ne seraient affectées que par la gravité.