Mise en évidence de la masse cachée

Le problème de la masse cachée est celui de la mesure de la densité de l'univers. Ainsi, en décomptant la somme des masses visibles par les observations directes, on arrive à moins de 80% de la somme des masses déduite de la gravitation des astres observés. D'où l'existence probable d'une matière invisible.

Introduction

Sujet de l'exposé:

La masse cachée peut être mise en évidence de deux manière différentes.

La première consiste à comparer deux théories de mesure de masse, la "masse lumineuse" et la "masse dynamique", la première ne tenant pas compte d'une éventuelle masse invisible (ou matière noire), contrairement à la seconde qui permet de mesurer toute la masse. Ces deux théories divergent.

L'autre approche du problème est fondée sur la relativité générale et les microlentilles gravitationnelles : les rayons lumineux sont déviés par la présence importante de masse (visible ou non), ce qui permet dans des cas précis de révéler de la masse invisible.

L'article est l'occasion d'expliquer ces deux approches de mise en évidence de la masse cachée.

Plan:

Première méthode
I. Mesure de la "masse lumineuse"
II. Mesure de la "masse dynamique"
III. Découverte de la masse cachée
Seconde méthode
IV. L'optique gravitationnelle
V. Les microlentilles gravitationnelles

1ère méthode

I. Mesure de la masse lumineuse

1. Principe:

Intuitivement, et c'est ce qu'on vérifie dans le système solaire, les astres de masse non négligeable sont ceux qui brillent, c'est-à-dire les étoiles. On pense donc pouvoir mesurer la densité de l'univers en comptant la somme des masses de toutes les étoiles, ou plutôt de tout ce qui est visible. Ceci peut s'effectuer dans notre galaxie, puis par le principe cosmologique et des modèles adaptés s'étendre à d'autres galaxies.

2. Mesure de la masse d'une étoile binaire

Les seules mesures de masse d'étoiles possibles sont celles d'étoiles binaires, c'est-à-dire, celles d'un système de 2 étoiles liées gravitationnellement. L'étude de leur mouvement relatif permet de déduire les masses. La masse totale ($M=M_1+M_2$) du système peut être obtenue grâce à la 3ème loi de Kepler : $M=a^3/T$ où a est le demi-grand axe de l'orbite relative ($a=a_1+a_2$) et T la période.

Comme ce cas est très fréquent dans l'univers d'après les observations, on a pu ainsi déterminer la masse d'un grand nombre d'étoiles et en déduire des propriétés. Par exemple : des étoiles de spectre à peu près identique ont sensiblement la même masse[1]. Ceci permet donc ensuite de déterminer indirectement la masse des étoiles à partir des seules propriétés de leur spectre.

3. Relation masse-luminosité des étoiles:

Globalement, plus l'étoile est lumineuse, plus elle a une masse importante et réciproquement. En fait, la luminosité n'est pas proportionnelle à la masse.

Cependant, près de 90% des étoiles obéissent à une relation masse-luminosité : il s'agit de celles qui sont localisées sur la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russel. Chaque étoile dont on connaît la masse et la luminosité est représentée par un point dans un graphique où la luminosité (ou la magnitude) est porté en fonction de la masse. On voit que la luminosité d'une étoile est très étroitement reliée à sa masse. Dans le cas où une étoile appartient à la série principale du diagramme HR, en première approximation, on a : $\log(L/L_\odot)=3,5*\log(M/M_\odot)$. De manière plus générale, on a[2]:

Relation Masse-Luminosité	Masse de l'étoile	Type spectral
$\log(L/L_\odot)=2,6*\log(M/M_\odot)-0,3$	$M/M_\odot<0,5$	M7V à K0V
$\log(L/L_\odot)=3,8*\log(M/M_\odot)$	$0,5<M/M_\odot<2,5$	K0V à B8V
$\log(L/L_\odot)=2,6*\log(M/M_\odot)+0,5$	$2,5<M/M_\odot$	B8V à 0

[1] *Liaisons scientifiques, méthodes de l'astrophysique, comment connaître et comprendre l'univers*, L. Gouguenheim. Hachette 1981. Page 165 (Dn°22).

[2] *Les sciences du ciel* sous la direction de Pierre Léna. Bilan & perspectives, Concepts & vocabulaire, Flammarion 1996. (Dn°25) Page 455

En fait, on a établit de cette manière des "modèles stellaires" qui relient des paramètres comme la masse, le rayon, la température, ..., à des quantités observables comme la luminosité, la couleurs ou des détails spectraux.

On différencie les étoiles appartenant à la série principale des autres par l'étude du spectre des étoiles qui est caractéristique. (Les raies d'absorption sont très fines pour les géantes et très larges pour les naines blanches). La relation masse-luminosité est une conséquence des lois fondamentales qui gouvernent la structure interne des étoiles : l'explication a été apportée en 1924 par l'astrophysicien A. Eddington[3].

4. Généralisation au gaz:

Quand on parle d'objet visible, il faut entendre "visible" au sens large, c'est à dire, objet qui émet du rayonnement électromagnétique quelque soit sa fréquence et pas uniquement limité au domaine du visible.

Des techniques similaires s'appliquent à d'autres objets astronomiques et à d'autre longueurs d'onde:

‘ Ainsi, le gaz froid rayonne en onde radio et est donc détectable. (Par exemple l'hydrogène rayonne à la longueur d'onde de 21 cm).

‘ Les objets qui rayonnent dans le domaine du visible sont les étoiles et les nuages de gaz chaud. (Par exemple l'hydrogène ionisé des "régions HII").

‘ Les rayons X et Gamma sont émis par des régions "actives" : reste de Supernovae, coeurs de galaxies ou nuages de gaz très chaud (plusieurs millions de degrés).

5. Densité lumineuse de l'univers:

On peut donc ainsi évaluer la densité de notre région de la Galaxie : on recense tous les objets qui rayonnent, on évalue leur masse et on fait la somme de ces masses. Ceci n'est applicable qu'au voisinage du soleil, car, pour peu qu'on s'en éloigne, l'éclat des étoiles s'atténue (à cause des poussières). On a pu s'apercevoir que l'ensemble des étoiles visibles (étudiées) ont en moyenne un rapport masse/luminosité 5 fois supérieur à celui du soleil. Dès lors, il suffit de mesurer la luminosité d'une galaxie, et en supposant que ces constatations sont vérifiées partout, on en déduit directement la masse de la galaxie. On obtient ainsi la densité des galaxies, puis de même celle des amas de galaxies et finalement celle de l'univers.

On obtient : d=10^-31 g*cm^{-3}. Remarque importante : il ne s'agit en fait que d'une limite inférieure de la masse totale, n'ayant pas pris en compte d'éventuels objets invisibles

II. Mesure de la masse dynamique

1. Principe:

i. Loi de Newton:

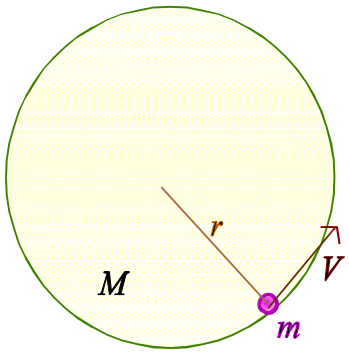
Pour un système galactique en équilibre (ni contraction, ni expansion subie), on considère un objet de masse m et de vitesse V gravitant autour d'un objet de masse M que l'on cherche. Comme le mouvement est circulaire, on a $\frac{G(m(M}{r^2}$ ' $m(\frac{V^2}{r}$. D'où : M' $\frac{V^2(r}{G}$.

Cette loi permet donc de mesurer la masse d'un astre autour duquel gravite un astre dont on peut mesurer la vitesse.

[3] Tout le paragraphe : Dn°22 page 165-167

ii. Théorème du Viriel:

Sous certaines hypothèses (équilibre du système entre autres), on a la relation suivante : $*E_p*'2(E_c$. Elle conduit encore à $\frac{G(m(M}{r}'m(V^2, \quad M'\frac{V^2(r}{G}$. Elle est utile pour mesurer la masse d'une galaxie dans laquelle les mouvements sont aléatoires (et non circulaire) : il suffit de connaître la vitesse moyenne des étoiles.



2. Masse dynamique des étoiles:

i. Mesure de vitesses : Effet Doppler Fizeau:

But : pouvoir déterminer la vitesse d'une étoile ou celle d'une galaxie.

Principe : lorsqu'une source lumineuse émet un rayonnement à une fréquence f_{source}, l'observateur le perçoit à une fréquence différente f_{obs}, dès lors que la source est en mouvement. On a : $\frac{(f_{source}\&f_{obs})}{f_{obs}}'\frac{V_{source}}{c}$ pour v<<c[4]. Notons que l'on obtient que la vitesse radiale (dans la direction de l'observateur).

Utilisation : il est donc possible depuis la Terre, de mesurer la vitesse radiale de n'importe quelle étoile ou galaxie à la seule condition que nous soyons capables d'en enregistrer le spectre avec suffisamment de précision.

ii. Système de deux astres:

Il est possible de déterminer la masse d'un corps en fonction de l'interaction qu'il effectue avec un autre corps (ainsi a été découverte Neptune). Dans un système binaire, comme les deux astres bougent, on peut remarquer la présence d'une masse importante en étudiant le mouvement de l'un des deux astres (par exemple, l'étoile visible si l'autre est invisible). En fait pour qu'on puisse observer un mouvement, il faut que la masse recherchée soit au moins du même ordre de grandeur que l'étoile[5].

Dans la pratique, on peut difficilement appliquer cette méthode à deux étoiles car elles sont trop proches l'une de l'autre pour que l'on bien effectivement les distinguer (l'une des deux pouvant être "cachée" par l'autre). Mesurer la masse dynamique de l'astre caché n'est pas réalisable facilement : on ne peut pas mesurer le déplacement de l'étoile visible car il est trop lent.

Notons cependant quand même que c'est par cette méthode qu'on mesure la masse des étoiles dans les systèmes d'étoiles binaires.

3. Masse dynamique de l'univers:

i. Masse dynamique des galaxies:

Pour calculer la masse d'une galaxie, soit elle est spirale et on établit la courbe de rotation de la galaxie donnant la masse en fonction de la distance au centre qu'on somme ensuite, soit il s'agit de galaxie elliptique où on utilise le théorème du Viriel pour arriver à déterminer de même la masse de la galaxie.

---

[4] Autre formule si v - c

[5] (En pratique, ce cas s'est trouvé : étoile de Barnard d'après Marc Lachièze-Rey, p.9. Depuis, on a montré que ce cas n'était pas valable.)

ii. Masse dynamique des amas de galaxies:

Il faut faire les hypothèses suivantes : d'une part, l'amas est en équilibre et d'autre part, on peut déduire de la mesure de la vitesse de quelques galaxies, la valeur de la vitesse moyenne des galaxies de l'amas. Ainsi, on utilise le théorème du Viriel pour calculer la masse totale des amas de galaxies.

iii. Densité de l'univers

On devrait en théorie faire la somme des masses dynamiques des galaxies ou des amas pour calculer la densité. Au total, la densité dynamique, donc la densité tout court, de l'univers doit être supérieur à $0,2*d_c = 10\text{^} -30\ g*cm^{-3}$.

III. Découverte de la masse cachée

1. Courbes de rotation des galaxies spirales:

i. Principe:

Il est possible en connaissant la vitesse de rotation d'un astre d'une galaxie spirale[6] de déduire la masse totale autour de laquelle il gravite. Ainsi, on fabrique des courbes de rotation : vitesse des astres en fonction de la distance au centre. On mesure la vitesse (radiale) des étoiles de la galaxies (en fait surtout celle du gaz présent encore plus loin du centre) et on en déduit la masse intérieure. De cette manière, on peut observer la masse totale, donc, y compris la masse cachée éventuelle.

ii. Confrontation des 2 méthodes présentées:

On confronte ensuite ces mesures à un modèle issu des mesures de la masse "lumineuse" où la masse apparaît concentrée au centre de la galaxie. En théorie, il devrait y avoir une décroissance "képlérienne" (en $1/r^{1/2}$).

Or, au contraire, la vitesse mesurée tend vers une constante (environ 200 km/s). Donc le modèle théorique est faux. La masse totale ne peut pas être constituée uniquement de masse lumineuse. La plus importante partie de la masse semble ne pas rayonner.

2. La masse cachée:

i. La masse cachée locale[7] : mise en évidence

' La masse lumineuse ne représente que 10% de la masse dynamique dans les galaxies spirales (constat généralisé plus ou moins facilement aux autres galaxies). Il semble donc qu'apparaît tout autour des galaxies un vaste halo de matière invisible. On l'appelle masse cachée, masse manquante, matière noire, matière sombre... La masse cachée locale est la masse cachée se trouvant à l'intérieur des amas de galaxie. C'est celle qu'on observe à partir des courbes de rotation des galaxies.

' Dans les amas, là encore, la masse "lumineuse" (celle des galaxies + celle du gaz

[6] En principe, pour connaître la masse d'une galaxie (spirale ou non), il suffirait de connaître parfaitement le mouvement d'une étoile à l'intérieur. Cela est cependant impossible en pratique car on ne peut (presque) pas distinguer les étoiles dans une galaxie, et il faudrait attendre qu'elle décrive une partie de son orbite (en théorie, son orbite complet) et cela prendrait un temps gigantesque.

[7] ou masse cachée dynamique (Dn°24)

hydrogène entre ces galaxies) sous-estime considérablement la masse "dynamique". Le désaccord augmente même avec la taille du système étudié : 99% de la masse serait invisible dans ces structures.

' La masse cachée locale se trouve, par définition, à l'intérieur des galaxies et des amas de galaxies. À l'intérieur d'une galaxie, les étoiles occupent les régions centrales et la masse cachée, elle, se situe plutôt autour[8] des ensembles sous forme de halos de manière moins concentrée et de manière plutôt diffuse (d'après les courbes de rotation).

ii. La masse cachée globale[9] : hypothétique

' Il se peut en fait qu'il y ait de la masse cachée entre les amas de galaxies. Cette masse cachée, appelée masse cachée globale, n'a pas été mise en évidence. Elle n'est qu'hypothétique et ne fait pas l'unanimité. Elle a été envisagée à la suite de la découverte de la masse cachée locale pour éventuellement fermer l'univers.

En fait, si on a mis en évidence la masse cachée de cette manière, on ne sait en revanche pas grand chose de cette matière ni la quantité exacte. Cette masse, non prévue et inconnue soulève de nombreux problèmes. Certain, non satisfait par cette matière ont voulu trouver d'autres explications à la divergence de ces méthodes (remise en cause des lois de Newton, ...). Or, en fait, on a un autre moyen totalement indépendant de mettre en évidence la masse cachée : les lentilles-gravitationnelles.

2ème méthode

IV. L'optique gravitationnelle

1. Principe de l'optique gravitationnelle[10]:

L'optique gravitationnelle est une nouvelle discipline de l'astronomie qui date des années 1980 et qui est fondée sur l'utilisation des effets relativistes prédits par la relativité générale et des principes hérités de l'optique traditionnelle géométrique. Elle étudie les images ou quasi-images d'une source (étoile, galaxie ou quasar) formées dans les domaines radio ou optique, lorsqu'une grande concentration de masse (qu'on appelle alors lentille ou microlentille gravitationnelle) s'interpose entre la source et l'observateur terrestre[11]. La théorie de la relativité générale dit que la présence locale de gravité courbe l'espace-temps et donc infléchit la propagation des rayons électromagnétiques (donc lumineux et radio entre autres).

2. Les lentilles gravitationnelles:

Fred Zwicky prévu dès 1937 que la présence d'une masse ponctuelle située à mi-distance entre la source et l'observateur devait concentrer la lumière en anneau circulaire dit

---

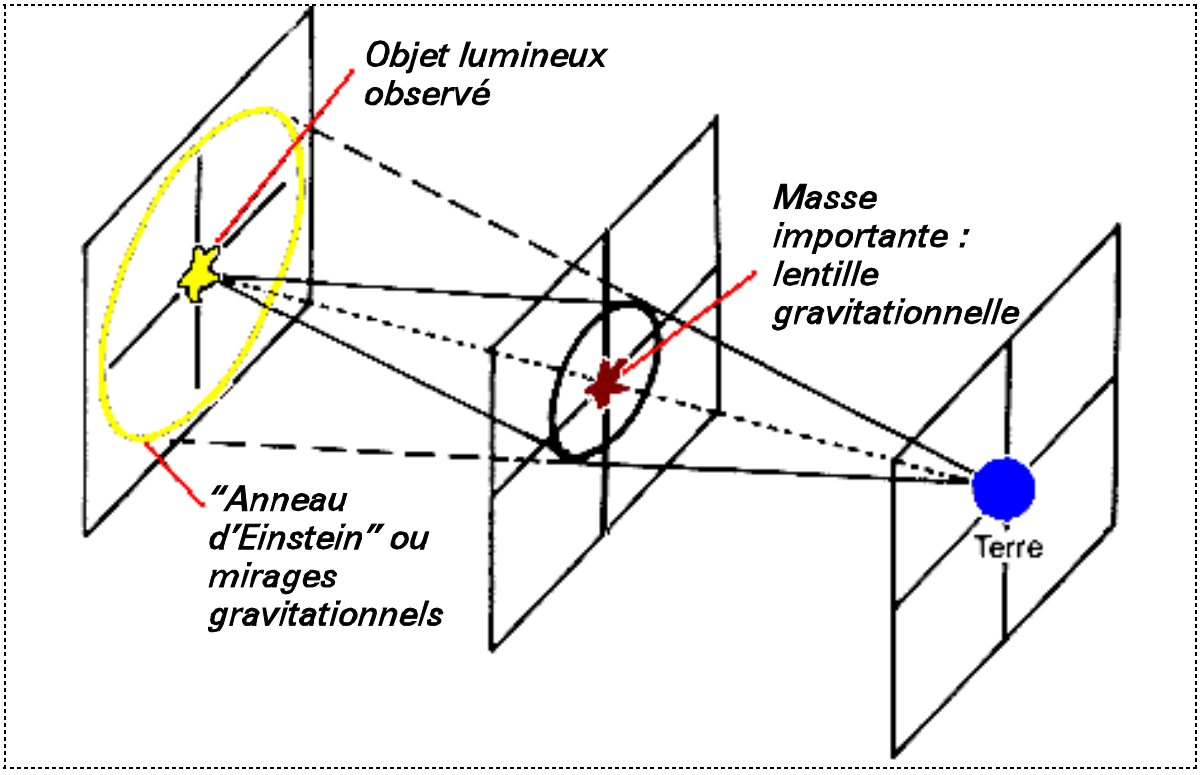
[8] D'après l'article de La Recherche n°246 septembre 1992, p. 969, (Dn°3), il semblerait que la matière noire se concentre plutôt au centre de l'amas.

[9] ou masse cachée cosmologique (Dn°24)

[10] Le principe est décrit en détail (avec des formules, etc...) dans l'article du CEA : *La recherche de microlentilles gravitationnelles* (Dn°24)

[11] Dn°25 page 385

"anneau d'Einstein" (inobservable en pratique)[12]. Lorsque les trois objets (source, lentille, observateur) ne sont pas alignés parfaitement, les images de la source se dédouble et on observe des mirages gravitationnels. En 1979 ainsi, pour la première fois on démontra l'existence de l'effet de lentille gravitationnelle. L'image et le ou les mirages possèdent des spectres identiques dans toutes les longueurs d'onde et les fluctuations de la lumière observées sur un spectre se retrouvent sur les autres avec un temps de retard caractéristique. Dans les années qui suivirent, on observa les premiers arcs gravitationnels (image déformée



d'une galaxie par un amas[13]).

V. Les microlentilles gravitationnelles

1. Les microlentilles gravitationnelles:

On parle de microlentille si la masse interposée est faible, typiquement si la lentille n'a plus la taille d'une galaxie, mais celle d'une étoile. Sa masse est trop faible pour engendrer la formation d'une image mais est suffisante pour concentrer le rayonnement de la source en direction de l'observateur par déflexion de la lumière, ce qui conduit à une amplification apparente de la brillance de la source lointaine[14]. Ainsi, l'effet de la microlentille gravitationnelle est un flash de lumière qui se produit lorsqu'un objet (étoile, naine brune, ...) passe presque exactement devant la source lointaine. La durée du flash lumineux dépend de

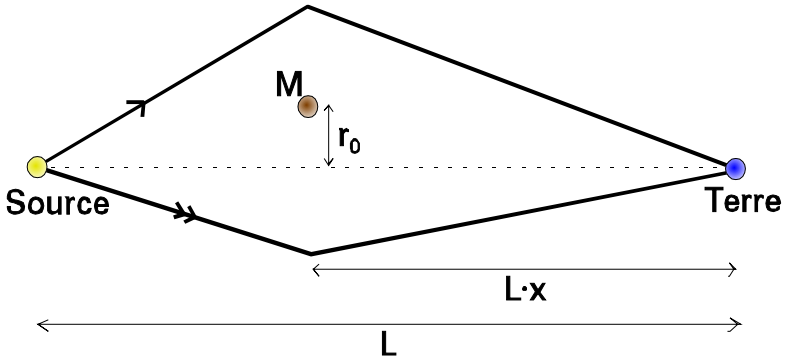
[12] La Recherche n°261, janvier 1994, p. 86 (Dn°12)

[13] Observé dans les années 70 dans les régions denses de l'univers (typiquement le centre des amas de galaxies). Doc Internet : Présentation d'EROS (Dn°13).

[14] Alain Bouquet (Dn°9)

la durée de passe de l'étoile et de sa masse[15].

On caractérise un tel phénomène par le fait que le phénomène doit être identique dans toutes les longueurs d'ondes[16], que l'évolution de l'intensité durant le flash doit être symétrique dans le temps et que cela ne doit, pour des questions de probabilité, ne se produire qu'une seule fois par étoile étudiée.



La distance maximale entre le rayon et la lentille pour que le phénomène soit observable est:

$$R_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} L x (1-x)}$$

2. Détecter de la masse cachée:

i. Principe:

La microlentille gravitationnelle est donc un moyen indirect de détecter la présence de masse. On détecte ainsi à la fois des masses visibles et des masses invisibles. En surveillant de tels événements, on peut alors découvrir de la masse cachée. On a déjà observé des mirages gravitationnels de quasar avec en guise de lentille, de la matière noire[17] sous forme de MACHO.

i. Mise en oeuvre:

Une étude de ces événements demande un temps d'expérimentation long et un traitement statistique et informatique des données pour s'en sortir. En effet, si cette technique a l'air intéressante, il faut cependant remarquer qu'avoir un alignement est un phénomène très rare : c'est environ une étoile du Grand Nuage de Magellan sur 2 millions qui doit subir à un instant donné une amplification supérieure à 30%[18]. Donc elle n'est pas facilement applicable. Cependant, actuellement, deux expériences sont en cours pour tenter d'évaluer la quantité de matière noire sous forme de naines brunes : EROS[19] [20] (France) et MACHO (Etats-Unis) observent le Grand Nuage de Magellan. OGLE (Etats-Unis & Pologne) est tourné vers le bulbe de notre Galaxie.

ii. Présentation d'EROS:

Le Grand Nuage de Magellan, galaxie satellite la plus proche de notre Voie Lactée constitue une cible idéale pour une recherche d'astres sombres du halo : situé à 55 000 pc (=1,6*10[18] km) du centre galactique, il est suffisamment lointain pour permettre de sonder une

---

[15] Dn°25 page 387

[16] Doc Internet : Présentation d'EROS (Dn°13)

[17] La Recherche n°183, décembre 1986, p. 1576, (Dn°7)

[18] Dn°24 page 48

[19] La Recherche n°261, janvier 1994, p. 86 (Dn°12) et Doc Internet : Présentation d'EROS (Dn°13)

[20] Expérience de Recherche d'Objets Sombres

fraction appréciable du halo et il est suffisamment proche pour que l'on puisse résoudre plusieurs millions d'étoiles en utilisant des temps d'exposition ne dépassant pas quelques minutes à une heure. Une des difficultés est que beaucoup d'étoiles présentent des variations de luminosité intrinsèques. On utilise donc les 3 caractéristiques définies plus haut pour écarter de tels candidats.

EROS est capable de chercher des astres sombres de masse comprises entre 10^{-7} M¬ et 1 M¬.

Il a fallu analyser plus d'un million d'étoiles du grand nuage de Magellan pendant un an pour détecter un événement de microlentille.

iii. Conclusions:

C'est donc un moyen de détecter de la masse cachée, mais c'est relativement peu pratique pour effectuer directement des mesures de masse.

Conclusion: connaissances sur la masse cachée

La mise en évidence de la matière noire par ces deux manières différentes a permis d'en assurer l'existence. Beaucoup de questions restent encore sans réponses :

Y a-t-il ou non, et dans quelle quantité de la masse cachée globale? La réponse permettrait de connaître la densité de l'univers et donc par exemple ensuite la topologie de l'univers, c'est-à-dire son avenir.

Sous quelle forme est la matière noire? Les astrophysiciens et les physiciens des particules ont proposé une série de candidats. Certain, généralement sous forme non-baryonique (ex: WIMPs), n'ont même pas une existence assurée. D'autre, généralement sous forme baryonique (ex: MACHO), ont été mis en évidence et on a constaté qu'ils ne pouvaient pas seuls constituer une partie significative de la masse cachée (ex: les naines brunes). En fait, ces dernières années, on a surtout supprimé des candidats. Le problème n'aura pas beaucoup avancé si on finit par ne plus avoir de candidats possibles.

Il reste donc encore beaucoup à faire pour percer le mystère de la masse cachée.

Définitions et constantes

Age de l'univers : 15 milliards d'années.

Constante de Hubble : elle varie en fait dans le temps. Valeur actuelle estimée : H_0 = 8,7*10^-20 s^{-1}.

d_c = 10^-29 g*cm^{-3}.

Densité au voisinage du soleil : d=0,1 M¬*$parsec^{-3}$.

Distance que peut parcourir un neutrino : 10^32 années-lumières.

Masse d'un axion : (si cela existe) 10^{-5} eV < m < 10^{-1} eV

Masse d'une étoile : entre 0,3 et 60 masse solaire.

Masse des leptons[21] : électron : m • 511 keV, muon : m • 106 MeV, tau : m • 1,8 GeV.

Masse du neutralino : m > 21,4 GeV

Masse du neutrino[22]: neutrino électronique : m < 4,5 eV, neutrino muonique : m < 170 keV, neutrino tauique : m < 24 MeV[23].

Masse solaire : M¬ = 2*10^30 kg

Particules et interactions : les particules de matière[24] de (spin 1/2) sont: 1. Les leptons : e (électron), μ (muon), □ (tau), $□_e$ (neutrino électronique), $□_\mu$ (neutrino muonique), $□_□$ (neutrino tauique) et 2. les quarks : u, c, t, d, s, b.

Le précurseur : Fritz Zwicky en 1933.

Quantité de matière noire : on estime actuellement que la masse cachée représente près de 90% de la masse totale.

Quasar [kwa-] ou [kazar] nom masculin (américain quasi stellar [object]) : Astre d'apparence stellaire et de très grande luminosité, dont le spectre présente un fort décalage vers le rouge. On considère généralement que les quasars sont les objets les plus lointains actuellement observés dans l'Univers. Ils semblent être des noyaux de galaxies dans un stade d'activité particulièrement intense. Leur luminosité est de l'ordre de cent à mille fois celle des galaxies, mais leur rayonnement est issu d'un volume très petit, de l'ordre du 1/100 du diamètre de celles-ci, et présente d'importantes fluctuations sur des durées, de l'ordre du mois[25].

Unité: le parsec : 1 parsec = 3,27 années-lumière = 31*10^22 km

Unité : l'unité astronomique : 1 u.a. correspond à la distance (moyenne) Terre-Soleil, c'est à dire 1,496*10^11 m (150 millions de km).

---

[21] Http://dphs10.saclay.cea.fr/Spp/Experiences/NOMAD/neutrino.html (Dn°11)

[22] La Recherche n°275, avril 1995, p. 413, (Dn°6)

[23] Http://www.unil.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/nonBaryons dit que m(ne) < 30 eV, m(nm) < 60 keV et m(nt) < 250 MeV.

[24] La Recherche n°275, avril 1995, p. 409, (Dn°6)

[25] Le Petit Larousse

Pour aller plus loin

1. Quelle quantité?

i. Topologie de l'univers:

D'un côté, il y a l'expansion de l'univers, de l'autre, l'attraction gravitationnelle qui agit contre cette expension. Et l'on se demande ce qui va finalement l'emporter. Pour savoir si l'univers est fermé (l'expansion va s'arrêter, il va y avoir rétraction puis le "Big Crunch") ou ouvert (expansion infinie) ou encore, s'il tend vers un état d'équilibre, il faut calculer la densité de l'univers et la comparer à la densité critique. On nomme Oméga = d/d_c. Si Oméga < 1, l'univers est ouvert, si Oméga > 1, il est fermé, et, solution qui tente beaucoup de cosmologistes, si Oméga = 1, ce sera l'équilibre. Connaître la topologie de l'univers est un problème qui intéresse beaucoup les cosmologues.

ii. La densité critique

Calcul[26] de la densité critique d_c correspondant au cas où l'énergie cinétique de l'univers compense exactement son énergie potentielle gravitationnelle. Considérons un volume sphérique de l'univers de rayon R (suffisamment grand). La vitesse d'un point de masse m à la surface est $V = R*H_0$. On a donc (avec G : constante de gravitation universelle):

$$\frac{E_c}{m} = \frac{(R H_0)^2}{2}; \quad \frac{E_{pg}}{m} = -\frac{GM}{R} = -G\left(\frac{4}{3}\pi R d\right.$$

D'où le résultat : $d_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$.

Soit, $d_c \approx 10^{-29}$ g*cm^{-3}.

iii. Masse cachée globale

Nécessairement, la masse cachée globale, si elle existe, ne peut être sous forme baryonique à cause des contraintes de la nucléosynthèse[27]. Mais elle peut très bien ne pas exister : tout dépend si Oméga doit ou non être égal à 1.

La masse cachée globale est, quant à elle, par définition en dehors des amas de galaxies. En fait, on ne sait pas bien où elle se situe plus précisément (de manière continue / discontinue entre les ensembles visibles ? de manière similaire à la répartition des ensembles visibles, mais invisible[28]? ...)

iv. Densité supposée de l'univers

Ne prendre en considération que la matière visible donne Oméga ≈ 0,02/0,01. Prendre en considération la masse dynamique dans les galaxies et les amas de galaxies (masse cachée dite locale) donne Oméga ≈ 0,2/0,1. On est donc loin de Oméga = 1. Le modèle de "l'inflation"[29] comme l'intuition de nombreux astrophysiciens pencherait pour Oméga = 1. Le modèle "inflationnaire" fut inventé pour résoudre certain nombre de difficultés conceptuelles

---

[26] La Recherche, n°156, juin 1984, p.838-848

[27] Marc Lachièze-Rey, p.20-21

[28] C'est aussi ce que laisse entendre l'article de La Recherche n°262, février 1994, p. 130 (Dn°4).

[29] Selon Lachièze-Rey, cette théorie serait un peut abandonnée, mais ce n'est pas ce que pense *Science et Vie* n°HS170 (Dn°20)

graves de l'ancienne théorie du Big-Bang. Il met à profit la capacité des transitions physiques qui ont accompagné l'apparition (par séparation) de chacune des forces fondamentales de la physique, à accélérer le mouvement d'expension de l'Univers[30]. On pense aussi qu'il y a une limite supérieure de la masse : $3*d_c$. (Nous sommes en fait incapable actuellement de déterminer précisément Oméga.)

2. Matière noire non baryonique

i. Caractéristiques:

La matière noire non baryonique (ou matière exotique) se divise en deux composantes[31] : une dite "chaude" qui serait constituée de particules légères qui étaient relativistes au moment du découplage photons-matière et dont la masse est inférieure à 1 keV, une autre, dont la masse est supérieure à 1 keV, appelée "matière froide", qui comprendrait essentiellement des particules lourdes interagissant faiblement avec la matière baryonique. La dynamique et la structure des grands amas de galaxies conduisent les cosmologistes à conclure que les particules non nucléaires contribuant à la majeur partie de la densité de l'univers ont une masse relativement élevée. Leur vitesse est donc non relativiste. C'est pourquoi on dit que la matière noire est froide.[32]

ii. Les WIMPs:

On appelle "WIMP" pour "Weakly Interacting Massive Particles" ces objets de matière "froide". Les particules froides conduiraient beaucoup plus naturellement à la formation des galaxies[33]. Les WIMPs doivent être des particules ne possédant que peu d'interaction avec la matière "ordinaire" car d'une part on ne les voit pas, et d'autre part, elles ne doivent pas intervenir dans les processus astrophysiques "ordinaires". Elles ne devrait donc pas être sensible aux interactions électromagnétiques et presque insensibles aux interactions nucléaires.

La plupart des WIMPs envisagés pourraient apparaître dans le cadre des théories de Super-symétrie. Cette théorie prévoit qu'au moins une particule super-symétrique d'une particule ordinaire soit stable et de masse convenable. Est-ce le gravitino (partenaire du graviton), le higgsino (partenaire des particules de Higgs), le photino (partenaire du photon) ? Le neutralino serait la particule super-symétrique la plus stable[34].

iii. Le neutrino

1. Origine:

Le neutrino[35] est une particule, encore assez mal connue, provenant de la désintégration Bêta du neutron : n -> e^- + p +anti-Nu_e. Tout le problème est de savoir si les neutrinos ont une masse, et dans ce cas, quelle masse. En fait, il n'est aujourd'hui possible que de connaître la limite supérieure de leur masse : 5 eV.

2. Atouts:

Premièrement, par rapport aux autres WIMPs hypothétiques, on a la certitude de l'existence du neutrino.

De plus, les neutrinos massifs auraient l'avantage de résoudre le problème de la masse cachée car, dépourvus de charge électrique, ils n'interagissent avec la matière que par

---

[30] *Science et Vie* n°HS170 (Dn°20)

[31] Doc internet (Dn°5)

[32] *Science et Vie* n°HS170, (Dn°20)

[33] Lachièze-Rey, p. 29

[34] Doc internet (Dn°5)

[35] Quand on parle de neutrino, il s'agit généralement du neutrino électronique.

l'interaction faible (donc très peu[36]) et car ils sont présents en abondance dans l'univers d'après le modèle du Big Bang : abondance du même ordre que celle des photons du rayonnement diffus cosmologique. (Il y a dans l'univers environs un milliard de fois plus de neutrinos que de protons[37], il y a environ 100 neutrinos par cm^3 [38]).

3. D fauts:

Mais en fait, on s'attendait à observer beaucoup plus de neutrinos en provenance du soleil qu'en réalité (3 fois plus). (Ceci peut peut-être s'expliquer à l'aide des WIMPs[39]). De plus, la présence de neutrino massifs compliquerait formidablement le modèle de formation des galaxies (mais pas celui de la formation des structures de grande taille). Et enfin, les études faites pour certaines galaxies montrent que si le neutrino constituait toute la masse cachée, il devrait avoir une masse se situant entre 80 et 90 eV, ce qui est trop important[40].

4. Conclusion:

En fait, le neutrino idéal serait massif et interagissant peu avec la matière en dehors de l'interaction gravitationnelle. Le neutrino reste un candidat possible pour la matière noire (même si il semble de moins en moins satisfaisant).

iv. Autres possibilités:

Un neutrino lourd de masse m : 100 eV < m < 1 GeV, des mini trous noirs, des agrégats de quarks... Peut-être aussi que les axions existent : hypothétiques particules dont certaines théories ont besoins[41].

3. Matière noire baryonique

i. Caractéristiques:

Les calculs de formation et d'abondance des éléments légers (hydrogènes (3/4 de la matière baryonique[42]), hélium (1/4 de la matière baryonique) et lithium) dans le cadre d'un modèle standard de cosmologie prévoient une densité de matière baryonique plus élevée que celle observée sous forme d'étoiles et de gaz[43]. Une part importante des baryons pourrait donc être non lumineuse[44].

Les contraintes sont beaucoup plus sérieuses que dans le cas de la matière non baryonique car nous connaissons déjà les propriétés essentielles de cette matière composée de protons et de neutrons comme tout ce qui nous entoure. Que cela peut t'il bien être ?

ii. Candidats exclus:

1. Le gaz (?)

Cela ne peut pas être du gaz car le gaz froid se serait concentré en étoile ou serait détectable en radio et en optique[45], et le gaz chaud (plusieurs millions de degrés) émettrait du rayonnement X que nous détecterions. De plus, il faudrait des quantités formidables de gaz

---

[36] Un neutrino d'un GeV n'a qu'une chance sur 10 millions d'interagir en traversant la Terre. (Dn°11)

[37] La recherche n°275, avril 1995, p. 409, (Dn°6)

[38] Http://dphs10.saclay.cea.fr/Spp/Experiences/NOMAD/neutrino.html (Dn°11)

[39] Lachièze-Rey p.32

[40] Http://www.unil.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/nonBaryons

[41] Lachièze-Rey, p. 31

[42] *Pour la Science* n°232, février 1997, (Dn°21)

[43] Ce n'est pas ce que prétend le Dn°21!

[44] La Recherche n°261, janvier 1994, p. 86 (Dn°12)

[45] L'hydrogène atomique neutre émet à 21 cm de longueur d'onde, Alain Bouquet (Dn°9).

pour atteindre la masse voulue (on en détecte bien, mais pas suffisamment). Le gaz ne semble donc pas pouvoir constituer la masse cachée locale[46].

En fait, un gaz pourrait peut-être convenir : H_2.

2. Poussières, comètes, astéroïdes, planètes

Les poussières sont exclues car elles obscurciraient tellement le ciel que nous nous en serions aperçus. Elles absorbent déjà de manière non négligeable le rayonnement des objets astronomiques. Elles ne constituent donc qu'une partie restreinte de la matière noire[47].

De même, les cailloux, les planètes ont une masse négligeable devant celle des étoiles dans les systèmes stellaires identiques au système solaire, et ne peuvent pas être si concentrés. En effet, supposer que la majorité de la matière noire est sous cette forme, c'est supposer des grandes abondances d'éléments lourds. Or ceci est en contradiction avec le modèle de la nuclésynthèse primordiale où H et He constituent 98% de la masse baryonique de l'univers[48].

iii. Candidats possibles:

1. Les nuages interstellaires de dihydrogène:

Ne peut-il pas exister du gaz non détecté dans les galaxies spirales ? Normalement, on détecte l'hydrogène avec sa raie d'émission à 21 cm dans les régions HI. Pourquoi n'y aurait t'il pas des nuages moléculaires de H_2 enveloppant les galaxies ? La molécules H_2 est un bon candidat car à la température du milieu interstellaire (3 K), elle ne produit aucune radiation, étant à l'état fondamental. (Elle ne se révèle qu'au voisinage d'étoiles chaudes : elle n'est détectable que dans l'UV lointain par absorbtion produite des étoiles derrières lui. (C'est ainsi qu'on en découvrit en 1969 puis plus tard encore.)[49]) De plus, au fil du temps, ce gaz fournit de la matière première à la formation des étoiles, contribuant ainsi à la lente formation des galaxies. D'autres arguments théoriques renforcent cette hypothèse qui n'a cependant reçu encore aucune confirmation observationnelle[50].

2. Les petites étoiles

Les étoiles de masse très faible (donc peu lumineuses) et réparties relativement loin du centre des galaxies (et pourquoi pas entre les galaxies des amas ?), difficilement détectables car moins lumineuses que les autres étoiles, pourraient apporter une solution au problème.

3. Les naines brunes (et rouges) ou MACHOs

MACHO signifie Massive Compact Halo Objects. Les naines brunes, de masse comprise entre 10^-7 M¤ (sinon elles s'évaporeraient) et 0,1 M¤ (sinon, les réactions thermonucléaires (fusion de l'hydrogène) se seraient amorcées pour donner naissance à de véritables étoiles[51]), sont des étoiles trop petites pour pouvoir briller : la force gravitationnelle en leur centre n'est pas suffisante pour engendrer les réactions nucléaires permettant d'émettre du rayonnement.

Il est difficile d'estimer la quantité de ces naines brunes dans l'univers, mais à partir des observations de naines brunes (par micro-loupe gravitationnelle), les astrophysiciens auraient conclu qu'elles ne pourrait représenter que 6% de la masse manquante de la Voie Lactée. À suivre...

---

[46] Rien n'est exclu pour la masse cachée globale.

[47] Http://www.unil.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/baryons (Dn°15)

[48] Http://www.unil.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/baryons (Dn°15)

[49] Quid 1995

[50] (Dn°15) & *Sciences et Avenir*, février 1994, p.7, (Dn°16). Plus de détails sur le Dn°15.

[51] La Recherche n°261, janvier 1994, p. 86 (Dn°12)

4. Les naines blanches

Les naines blanches sont formées à partir des étoiles de la taille du soleil (masse < 1,44 M¬) après le stade de la géante rouge. Ces étoiles, après avoir épuisé tout leur combustible nucléaire, se collapsent jusqu'à un rayon d'une dizaine de milliers de kilomètre et une densité de 108 kg/m^3, ce qui les rend difficilement observables. Ces naines blanches pourraient constituer jusqu'à 10% de la matière noire[52].

5. toiles neutrons et trous noirs

Les étoiles à neutrons (1,4 M¬ < m < 2,2 M¬) et les trous noirs (m > 2,2 M¬) ne représentent qu'une faible partie de la masse cachée car les étoiles d'où ils proviennent sont peu nombreuses dans les galaxies[53].

Une autre possibilité serait celle de trous noirs super-massifs[54] (dont l'existence demeure assez controversée).

4. Pas de matière noire ?

i. Erreurs de mesures ?

Aujourd'hui, il est impossible, même en prenant compte les marges d'erreurs, que 90% de la matière nous apparaisse encore invisible vu le nombre de mesures effectuées.

ii. Remise en cause des lois fondamentales de la dynamique:

La modification de lois de Newton : Approche[55] non conventionnelle du problème de la masse cachée : création d'une théorie (par exemple la théorie "MOND") pour résoudre le problème de la masse cachée à travers une remise en cause des lois fondamentales de la dynamique. Très bons résultats pour résoudre le problème mais deux défauts majeurs : théorie non vérifiable expérimentalement et incompatible avec la relativité générale. Théorie qui semble abandonnée aujourd'hui.

iii. Autres théories:

Il existe en fait plein de théories différentes qui expliqueraient plus ou moins le problème, mais n'ont pas encore été vérifiées ou ne sont tout simplement pas vérifiables. Parmi elles, il existe la théorie des Super-cordes[56] qui nous plonge dans un monde à N dimensions pourrait expliquer le problème de la masse manquante...

---

[52] Http://www.unil.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/baryons (Dn°15)

[53] (Dn°15)

[54] Lachièze-Rey p.36

[55] La Recherche n°196, février 1988, (Dn°1)

[56] Lachièze-Rey p.32-34

Bibliographie:

Principaux articles:

La masse invisible de l'univers par T. X. Thuan et T. Montmerle. LA RECHERCHE N°139 DÉCEMBRE 1982
La matière sombre des galaxies spirales par Vera Rubin. POUR LA SCIENCE AOÛT 1983
La masse cachée de notre Galaxie par Jean Clavel. LA RECHERCHE N°148 OCTOBRE 1983
L'avenir de l'univers par Nicolas Prantzos et Michel Cassé. LA RECHERCHE N°156 JUIN 1984
Des galaxies qui amplifient la lumière par François Hammer. LA RECHERCHE N°173 JANVIER 1986
Une lentille gravitationnelle invisible par Daniel Kunth. LA RECHERCHE N°183 DÉCEMBRE 1986
La modification des lois de Newton par Mordehai Milgrom. LA RECHERCHE N°196 FÉVRIER 1988
Les naines brunes par Roger J. Tayler. LA RECHERCHE N°197 MARS 1988
Comment voir la masse cachée des galaxies par P. Bareyre, E. Maurice, L. Prevot et M. Spiro. LA RECHERCHE N°229 FÉVRIER 1991
L'univers invisible trahi par la lumière par B. Fort et Y. Mellier. LA RECHERCHE N°252 MARS 1993
Le neutrino, une particule à problèmes par M. Cribier, M. Spiro et D. Vignaud. LA RECHERCHE N°275 AVRIL 1995
La masse cachée dans l'univers par Marc Lachèze-Rey. PLANÈTE ET COSMOS : REVUE DU CEA.
La recherche de microlentilles gravitationnelles par Alain Milsztajn. PLANÈTE ET COSMOS : REVUE DU CEA
La matière sombre dans l'univers par Lawrence Krauss. POUR LA SCIENCE HS

Quelques adresses Internet (valables en 1998):

http://cdfinfo.in2p3.fr/Experiences/Astrop/AGAPE/MN par Alain Bouquet
*http://dphs10.saclay.**cea**.fr/Spp/Experiences/NOMAD/neutrino.html*
*http://www.**unil**.ch/sc/Pages/7_Articles/Phys/0_matNoire.html* par Miroslava Zavadsky
http://www-dapnia.cea.fr/Spp/Experiences/MAT_NOIRE/matiere.html
*http://www.lal.in2p3.fr/**EROS*** : site de l'expérience EROS

Ouvrages:

Liaisons scientifiques, Méthodes de l'astrophysique, Comment connaître et comprendre l'univers par L. Gouguenheim. HACHETTE 1981
Les sciences du ciel sous la direction de P. Léna. BILAN & PERSPECTIVES, CONCEPTS & VOCABULAIRE. FLAMMARION 1996
La masse cachée dans l'univers par Marc Lachièze-Rey. ENCYCLOPÉDIE DICLEROT.

Nicolas ROFFET
Rédaction: 1998
Web: http://roffet.com/documents/sciences/mise-en-evidence-de-la-masse-cachee/
E-mail: mise-en-evidence-de-la-masse-cachee@roffet.com