

# **LA MATIERE NOIRE DANS LES AMAS DE GALAXIES**

## **Résumé :**

**C'est en 1933 que F. Zwicky a mis en évidence pour la première fois l'existence de la matière noire dans l'amas de la chevelure de Bérénice (Coma). Depuis, la quantité et la nature même de cette matière noire sont deux questions fondamentales auxquelles les cosmologistes tentent de répondre.**

**Cette matière noire (ou matière sombre ou masse manquante) est indirectement observée aussi bien à l'échelle des galaxies qu'à celle des amas de galaxies et à l'échelle de l'univers entier. La matière lumineuse, la seule que nous voyons directement, semble représenter moins du dixième de la masse de l'univers, peut-être même à peine un centième de cette masse. L'essentiel est de la matière noire.**

**Les amas de galaxies sont les structures virialisées les plus importantes de l'univers, ils constituent d'excellents outils pour la cosmologie. Ils permettent d'étudier la distribution de la matière noire et nous apportent une estimation de la densité de matière de l'univers, paramètre clé de la cosmologie actuelle puisqu'il permet de déterminer l'évolution de l'univers.**

## • Introduction

La majorité des galaxies sont isolées dans l'univers à des distances mutuelles très grandes on les appelle les galaxies de champ. Les autres se rassemblent en structures qu'on appelle les amas de galaxies. Les amas de galaxies constituent donc les objets les plus grands de l'univers, ils réunissent pour les plus riches d'entre eux plusieurs milliers de galaxies dans un rayon de quelques megaparsecs. Les galaxies dans un amas subissent de fréquentes et violentes interactions entre elles au cours desquelles les forces de marée les disloquent.

On pense que les galaxies spirales initialement présentes fusionneraient alors en systèmes plus sphériques qui, après une phase de formation intense d'étoiles épuisant le gaz, donneraient des galaxies elliptiques situées généralement au coeur des amas. Mais les galaxies ne sont qu'une toute petite composante d'un amas: l'essentiel de la masse de l'amas se trouve dans une matière non-lumineuse, qui n'émet dans aucune longueur d'onde. Cette matière « noire » a été mise en évidence pour la première fois dans l'amas de galaxies COMA par l'astronome suisse Zwicky. Nous savons maintenant que cette matière noire domine l'univers.



*Fig. 1 : Les galaxies se regroupent entre-elles pour former des structures gravitationnelles plus grandes qu'on appelle amas de galaxies. Ici, on voit l'amas de coma (dans la constellation de la chevelure de Bérénice) observé en optique.*

- **Mise en évidence de la matière noire**

Les galaxies d'un amas se déplacent à plusieurs centaines de km/s les unes par rapport aux autres. Seules les vitesses le long de la ligne de visée (vitesses radiales) sont observables grâce à l'effet Doppler.

Ces **vitesses particulières** résultent de la gravitation exercée sur chacune d'elles par toutes les autres.

Il est donc simple d'estimer la masse de l'amas connaissant les distances et les vitesses particulières des galaxies membres à partir de la relation :

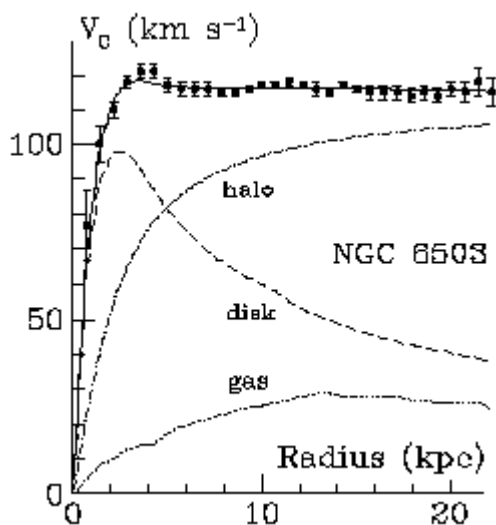
$$V^2/R = GM/R^2$$

qui donne un ordre de grandeur de la masse de l'amas:

$$M \sim 10^{14} \text{ Mo } [V/1000 \text{ km/s}]^2$$

**Pour une vitesse particulière typique d'un amas  $V=1000$  km/s, on obtient une masse de  $10^{14}$  Masses solaires c'est-à-dire 10 à 100 fois plus que la somme des masses individuelles des galaxies !**

C'est en appliquant ce théorème simple que Zwicky a mis en évidence l'existence de la masse cachée dans les amas de galaxies. Nous savons maintenant que cette matière noire est détectée aux échelles plus petites comme les galaxies elles-mêmes grâce à la mesure des courbes de rotation.



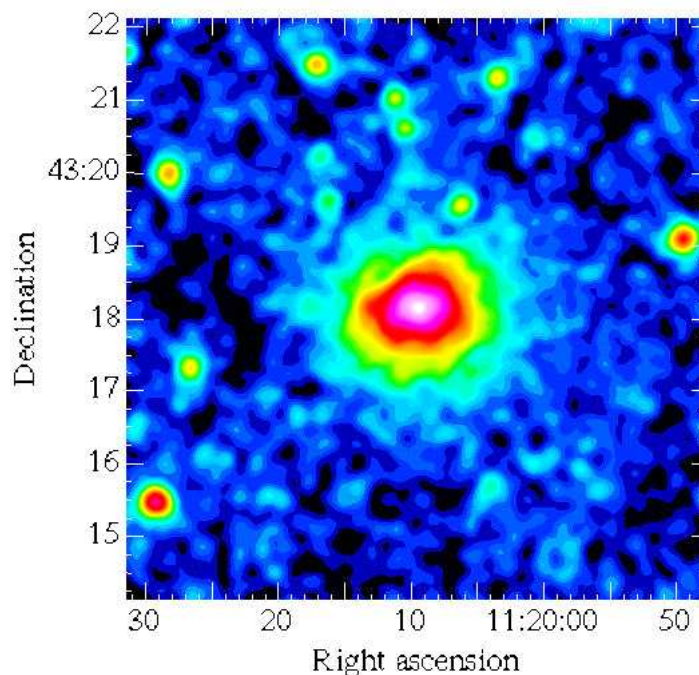
*Fig.2 : Courbe de rotation de la galaxie spirale NGC 6503. Les points correspondent aux données observationnelles.*

- **Le gaz chaud dans les amas de galaxies**

Dans les années '70 avec le lancement des premiers satellites X on s'est rendu compte que les amas de galaxies sont également de forts émetteurs X, signe de présence d'un gaz très chaud baignant dans le milieu intra-amas. Ce gaz en équilibre hydrostatique d'une température de quelques millions de degrés Kelvin constitue la deuxième composante la plus importante de l'amas après la matière noire.

Il est facile de se rendre compte que de l'hydrogène en équilibre thermodynamique dans un amas est nécessairement à haute température. Il suffit d'écrire que  $3kT/2 = m_p V^2/2$  ( $k$  étant la constante de Boltzmann et  $m_p$  la masse du proton) pour se rendre compte qu'une vitesse de 1000 km/s, typique des mouvements dans un amas, implique une température  $T \sim 40$  millions de degrés. De l'hydrogène chauffé à de telles températures émet dans les longueurs d'ondes des rayons X mous.

On s'est ainsi rendu compte que la quantité totale de gaz dans l'espace **entre** les galaxies de l'amas est bien supérieure à la quantité de gaz **dans** les galaxies elles-mêmes.



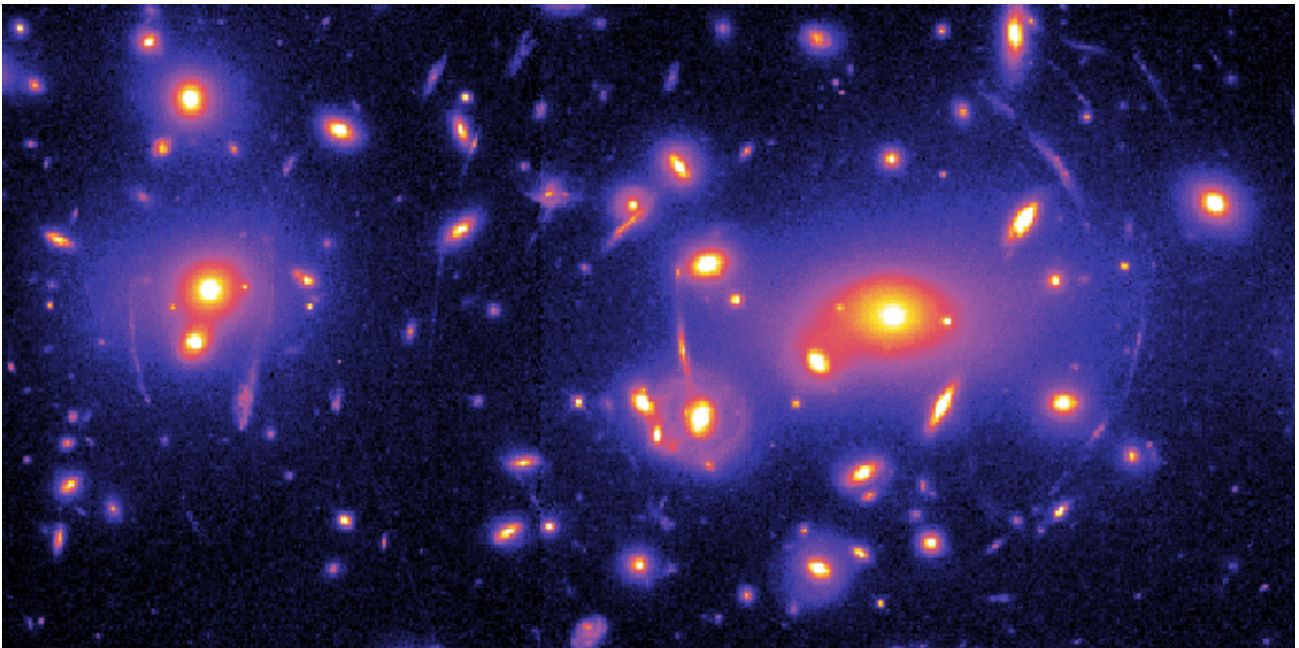
*Fig.3 : Le gaz chaud émetteur du rayonnement X remplit le milieu intra-amas et constitue près de 30% de la masse totale. Ici on voit l'émission X de ce gaz observé par le satellite européen XMM*

*dans l'amas distant RXJ1120+4318 ( $z = 0.6$ ).*

L'intensité de l'émission X du gaz chaud intergalactique, mesurée par les satellites X tels que XMM, dépend du profil de température (mesuré par le spectre X) et du profil de densité du gaz, qui dépend du potentiel gravitationnel dans lequel il est plongé. On peut ainsi obtenir simultanément le profil de densité de l'amas et le profil de densité du gaz, et donc la quantité de masse totale et également la fraction de gaz et par extension la fraction baryonique (si on ajoute la faible contribution des étoiles) dans les amas. *Le résultat est sans ambiguïté: l'amas est immergé dans un halo massif, environ 3 à 10 fois plus massif que le gaz.*

### • LES ARCS GRAVITATIONNELS

La découverte en 1986 de structures étonnantes en forme d'arcs dans certains amas de galaxies comme Abell 2218 (ci-dessous) provoqua beaucoup d'intérêt. On comprit très vite qu'il s'agissait d'images déformées de galaxies situées en fait **très loin derrière l'amas**.



*Fig. 4 : On connaît aujourd'hui plusieurs amas très massifs qui déforment les images des galaxies situées dans l'arrière-plan. Ici on voit A2218, dans la constellation du Dragon, observé par le télescope spatial américain Hubble. Des dizaines d'arcs entourent les galaxies contenues dans l'amas.*

La déformation de l'image qui est due à l'effet de **lentille gravitationnelle**, permet d'estimer la masse de l'amas en avant-plan responsable de cette déformation. L'étude

de la déformation de l'image, c'est à dire le nombre d'images de la même source, la courbure en arc de ces images, leur position, leur taille et leur orientation, permet de reconstruire la distribution de masse de l'amas.

## • LES AMAS DE GALAXIES EN COSMOLOGIE

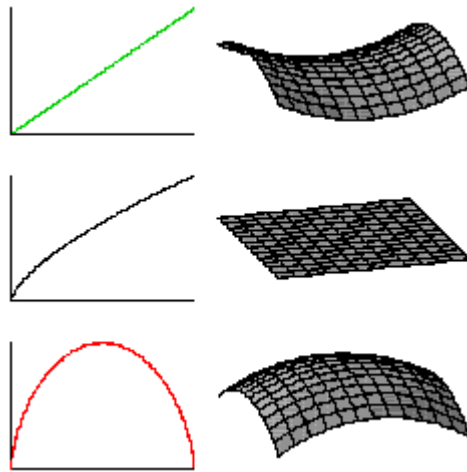
Les amas de galaxies sont les objets virialisés les plus grands de l'univers et de ce fait constituent d'excellents outils pour la cosmologie. En particulier ils constituent des tests cosmologiques et permettent en particulier de peser l'univers. Une des

Alors pourquoi et comment peser l'univers ?

Une des questions clés de la cosmologie moderne est celle de la densité de matière actuelle de l'univers. Connaître sa valeur permettrait de savoir si l'expansion de l'univers se poursuivra indéfiniment ou si au contraire elle s'arrêtera un jour pour finir sa course par une phase de contraction. C'est la valeur du paramètre  $\Omega = \rho/\rho_c$  qui est égal au rapport de la densité de l'univers à sa densité critique  $\rho_c = 2 \cdot 10^{-29} \text{ g/cm}^3$  qui détermine dans quel cas de figure on se trouve. Si par exemple si  $\Omega > 1$  l'univers se contractera alors que si  $\Omega < 1$  l'univers sera en expansion indéfiniment (voir tableau ci-dessous).

### Les modèles d'Univers

| Modèle            | hyperbolique   | euclidien | sphérique      | stationnaire |
|-------------------|----------------|-----------|----------------|--------------|
| Evolution         | expansion sans |           | faible expans. | contraction  |
| Rayon de courbure | < 0            | 0         | > 0            | infini       |
| Densité           | < 1            | 1         | > 1            | 2            |



*Fig.5 : La densité de l'univers détermine son avenir et la géométrie de l'espace-temps . Si  $\Omega < 1$  la géométrie de l'espace-temps est hyperbolique et l'univers est dit « ouvert ». Son expansion se poursuivra indéfiniment (courbe d'en haut). Si  $\Omega = 1$ , l'espace-temps a une géométrie plate ou euclidienne (figure du milieu). Si  $\Omega > 1$ , la géométrie est sphérique et l'univers est dit « fermé ». La gravitation dans ce cas prendra le dessus sur l'expansion et l'univers se contractera pour finir en un « big-crunch » par opposition au « Big-bang ».*

Il existe plusieurs méthodes qui permettent en principe de déterminer la valeur du paramètre cosmologique  $\Omega$  basées sur ce qu'on appelle des tests cosmologiques.

Les propriétés des amas permettent de développer trois tests cosmologiques :

Le premier est le plus ancien consiste à mesurer le rapport masse/luminosité (M/L). La masse totale est déterminée à partir des vitesses particulières des galaxies (voir plus haut) et la luminosité est obtenue en sommant sur les luminosités des galaxies individuelles. C'est en appliquant cette méthode que Zwicky a mise en évidence la matière noire. Le rapport M/L typique d'un amas de galaxies est  $M/L \sim 300$  fois le rapport M/L du soleil qui est égal à 1. Ce rapport comparé au rapport (M/L)<sub>c</sub> critique, c'est-à-dire le M/L correspondant à un univers de densité critique ( $\Omega = 1$ ) donne une estimation de  $\Omega = (M/L)/(M/L)_c \sim 300/1300 = 0.23$  (avec (M/L)<sub>c</sub>  $\sim 1300$ ). La dynamique des galaxies dans les amas de galaxies conduit donc à une valeur petite de  $\Omega$ . Cependant cette méthode souffre de plusieurs incertitudes et on préfère appliquer d'autres tests basés sur les observations dans le domaine X. Le premier de ces tests est basé sur le lien qui existe entre l'histoire de la formation des structures et la valeur même de  $\Omega$ . L'étude théorique de la formation des structures montre en effet que le déroulement de l'histoire de la formation des structures doit être différente selon la densité de l'univers : dans un univers à faible densité les structures ne peuvent plus se former à bas décalage spectral z, dans un tel univers les structures comme les amas de galaxies se sont formés tôt et n'ont subi aucune modification depuis. Au contraire dans

un univers critique ( $\Omega = 1$ ) les structures continuent à se former encore aujourd'hui. Une conséquence immédiate est que dans un univers à faible densité la densité numérique des amas de galaxies doit avoir peu évolué dans un passé récent. Au contraire dans un univers critique, cette quantité change radicalement. Ainsi les gros amas chaud ( $T = 100$  millions de degrés) ne devraient pas exister à des décalages spectraux de l'ordre de l'unité et au-delà. Les observations d'amas lointains pourraient donc résoudre le problème de la densité de l'univers. L'application de ce test demande toutefois de disposer d'échantillons d'amas distants pour lesquels la température a été mesurée. Grâce au satellite européen XMM cette information sera bientôt accessible et l'application de ce test sera alors possible.

Enfin le troisième test est basé sur le contenu baryonique des amas. En effet la mesure de la fraction de baryons (gaz chaud + étoiles)  $f_b = M_b / M = \Omega_b / \Omega$  permet d'apporter une contrainte sur la densité de l'univers  $\Omega = \Omega_b / f_b$ . La valeur de  $\Omega_b$  est déterminée grâce à la nucléosynthèse primordiale  $\Omega_b = 0.08$  (si on prend comme constante de Hubble  $H_0 = 50$  km/s/Mpc). Les résultats actuels conduisent à des valeurs de la fraction de baryons entre 12% et 15%, c'est-à-dire des valeurs de  $\Omega$  entre 0.66 et 0.55.

## • Conclusion

L'étude des amas de galaxies confirme – par différentes méthodes – le résultat historique de Zwicky.

### **Il existe de la matière noire dans les amas de galaxies.**

Les différentes méthodes, indépendantes dans leurs principes physiques et dans les hypothèses sous-jacentes, concordent quant aux résultats: il y a dans un amas de galaxies près de 100 fois plus de matière que l'on en voit dans la partie lumineuse des galaxies.

De cette matière noire, une partie importante (10 à 30%) est de la matière baryonique (essentiellement de l'hydrogène). La nature de cette matière noire est encore inconnue.

Connaître la quantité de matière noire nous permet de connaître la densité de l'univers paramètre clé de la cosmologie, puisque sa valeur détermine l'avenir de l'univers. L'étude des amas de galaxies en particulier l'analyse de leurs propriétés dans le domaine X permet d'élaborer des tests cosmologiques qui permettent de mesurer le paramètre de densité  $\Omega$ . La combinaison des résultats obtenus avec les amas de galaxies avec ceux obtenus par le satellite WMAP sur le fond cosmologique permet de déterminer l'évolution et la géométrie de l'univers.



### • *Documentation et sites web*

Le Big Bang par J. Silk, Editions Odile Jacob

Histoire et géographie de l'univers par A. Blanchard, Belin-CNRS Editions

<http://www.astrosurf.com/lombry/cosmos-problemestd.htm>

<http://hubblesite.org/newscenter/>

[http://chandra.gsfc.nasa.gov/docs/xmm\\_1c/gallery](http://chandra.gsfc.nasa.gov/docs/xmm_1c/gallery)

<http://cdinfo.in2p3.fr/Culture/Matierenoire>

### *Plus d'informations*

[Edelweiss, Expérience de détection directe de WIMPs \(CNRS\)](#)

<http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/n392/html>

[Candidats pour constituer la matière noire \(UNIL\)](#)

[http://gaia.unil.ch/sc/pages/bazar/articles/phys/matnoire//4\\_matnoire.htm](http://gaia.unil.ch/sc/pages/bazar/articles/phys/matnoire//4_matnoire.htm)

[Dark Matter, Center for Particle Astrophysics](#)

<http://cfpa.berkeley.edu/darkmat/dm.html>

[Dark Matter and Large Scale Structure](http://www.slac.stanford.edu/pubs/confproc/ssi94/ssi94-006.html), Joel Primack (SLAC)  
<http://www.slac.stanford.edu/pubs/confproc/ssi94/ssi94-006.html>  
[The Dark Matter Universe](http://www.zebu.oregon.edu/1997/ph41011.html) (U.Oregon)  
<http://www.zebu.oregon.edu/1997/ph41011.html>  
[Cosmological Dark Matter: An Overview](http://www.astro.ucla.edu/~agm/darkmtr.html), Alex Markowitz (UCLA)  
<http://www.astro.ucla.edu/~agm/darkmtr.html>  
[Simulation of the large scale structure of the universe](http://astro.princeton.edu/BBOOK/SCIENCE/LSS/lss.html) (Princeton)  
<http://astro.princeton.edu/BBOOK/SCIENCE/LSS/lss.html>  
[WIMPS versus MACHOS](http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/dmtalk/sld001.htm), D.Bennett (U.Notre Dame)  
<http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/dmtalk/sld001.htm>