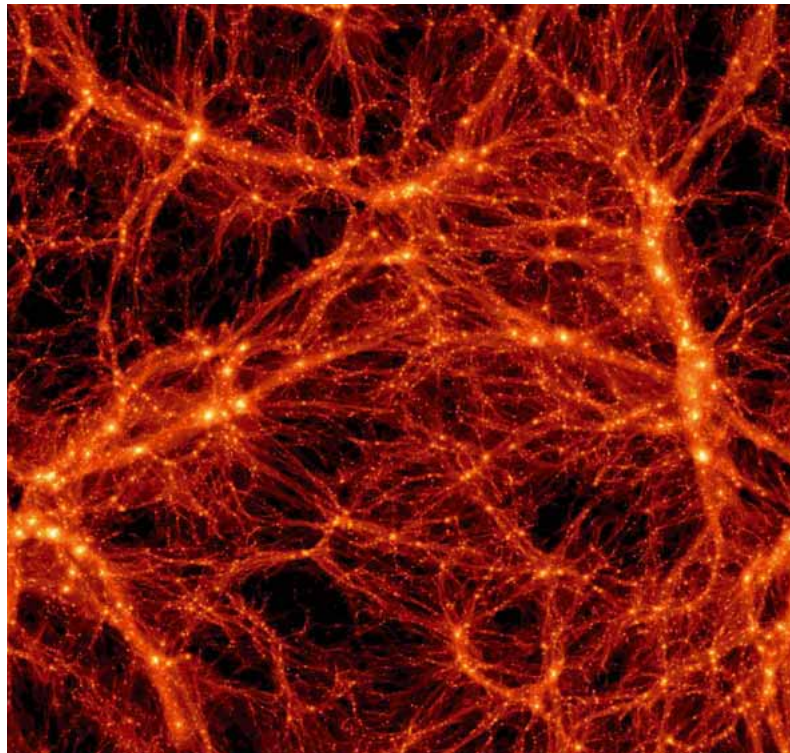


La toile d'araignée cosmique

L'Univers, à l'origine pratiquement homogène, est aujourd'hui une structure discontinue (des objets et du « vide ») et hautement hiérarchisée. Les plus gros objets actuels sont les amas de galaxies. Ils constituent l'aboutissement de l'évolution de l'Univers sous l'effet de la gravité.

L'Univers tel que nous l'observons est rien moins qu'homogène. Il présente même une forte organisation hiérarchique : les **étoiles** sont regroupées dans des **galaxies**, qui elles-mêmes s'assemblent pour dessiner une véritable « toile d'araignée » tridimensionnelle. Elles se répartissent en effet sur des nappes délimitant de grandes alvéoles quasiment vides. L'intersection de ces surfaces définit des filaments où se concentrent la plupart des galaxies. Au croisement des filaments eux-mêmes se trouvent les **amas**, vastes concentrations pouvant contenir jusqu'à plusieurs milliers de galaxies. Comment l'Univers s'est-il ainsi structuré ? C'est une des grandes questions de la **cosmologie**. L'observation du **fond diffus cosmologique** (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62) montre que l'Univers est constitué à 85 % de **matière noire**, initialement distribuée de façon presque homogène. Les petits écarts à l'homogénéité sont certainement à l'origine des structures observées aujourd'hui, formées essentiellement par la **gravitation** (voir *À la recherche des grands ancêtres*, p. 52). Les zones les plus denses attirent la matière environnante tandis que les zones les moins denses se vident progressivement. L'Univers devient ainsi de plus en plus hétérogène au fil du temps. Cependant son expansion, qui tend à diluer la matière, limite ce processus.



C. Pichon, R. Teyssier 2007

Distribution actuelle de la matière noire dans une région de 100 x 100 x 10 millions de **parsecs** d'un modèle d'Univers simulé dans le cadre du **projet Horizon**.

La matière noire, moteur de l'évolution

Pour vérifier leur compréhension de la formation des structures, les astrophysiciens confrontent en permanence les prédictions de **modèles** aux observations. Mais cela pose deux problèmes. Les caractéristiques de la distribution initiale de matière noire sont maintenant connues avec assez de précision pour simuler son évolution – sous l'effet de la gravitation dans un Univers en expansion – avec de puissants calculateurs. Il en résulte effectivement une structure à grande échelle semblable à une toile d'araignée. Le premier problème, propre à la **simulation**, tient à la matière visible. L'intuition suggère qu'elle « suive » la concentration de la matière noire et se structure de façon similaire, mais il est ardu de le démontrer. En effet, la formation des étoiles, des galaxies, et l'évolution du gaz intergalactique au sein des structures de matière noire font intervenir des processus très complexes, difficiles à modéliser (voir *Formation des structures de l'Univers : le jeu des modèles*, p. 68). L'autre problème, observationnel, est évidemment la cartographie de la matière noire réelle. Un véritable défi pour les astronomes...

En 2007, une équipe internationale d'astronomes, à laquelle participent des scientifiques du Service d'astrophysique du CEA/Irfu a pourtant publié la première cartographie tridimensionnelle de l'ensemble de la matière, lumineuse et noire, dans une portion du ciel. Il s'agit en l'occurrence du champ COSMOS, une région grande comme environ neuf fois la surface apparente de la Lune. Les astronomes ont utilisé l'**effet de lentille gravitationnelle** pour

mesurer indirectement la distribution de la matière noire à grande échelle (avec le télescope spatial Hubble). La distribution de la matière visible, elle, était mesurée par des instruments au sol, comme le télescope japonais Subaru à Hawaii, le VLT (*Very Large Telescope*) au Chili et le CFHT (télescope Canada-France-Hawaii), et dans l'espace par l'observatoire XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) ; figure 1. Pour la première fois, des cartes ont été obtenues pour différentes distances, et donc différents âges de l'Univers. Elles montrent que la distribution de matière noire évolue dans le temps en accord avec les lois de la **gravité**. Les diverses composantes de la matière visible sont distribuées à l'intérieur de structures définies par la densité de la matière noire. Ces résultats confirment le modèle cosmologique qui prédit que la formation des structures de l'Univers est dominée par la dynamique de la matière noire.

Les nœuds de la toile cosmique

Le modèle de formation des galaxies et des amas de galaxies, au sein des grandes structures, repose sur le concept d'« effondrement hiérarchique » (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62). Quand un grumeau de matière devient suffisamment dense, il s'effondre sur lui-même, se découplant de l'expansion⁽¹⁾. Les petites surdensités s'effondrent d'abord, aboutissant à la formation des premières étoiles et galaxies. Les premiers groupes de galaxies apparaissent plus tard, vers un décalage spectral⁽²⁾ d'environ 2. Depuis cette époque, les amas se forment et grossissent par **accrétion** continue de matière environnante, et par fusion occasionnelle d'amas entre eux. Les amas de galaxies sont ainsi la manifestation la plus récente de cette formation hiérarchique des structures. Situés au croisement des filaments cosmiques, ce sont les plus grands « objets » de l'Univers, c'est-à-dire les structures les plus massives découplées de l'expansion. Leur composition reflète celle de l'Univers dans son ensemble : 85 % de matière noire et 15 % de matière visible. Cette dernière est essentiellement constituée de gaz chaud (plusieurs dizaines de millions de degrés) observable en **rayons X**. Les galaxies observées en **lumière visible** forment moins de 3 % de la masse totale.

Comment les amas eux-mêmes ont-ils évolué ? L'observation en rayons X avec les observatoires modernes tels que XMM-Newton et Chandra a joué un rôle central dans les progrès récents dans ce domaine. XMM-Newton, avec sa très grande surface collectrice, peut détecter et étudier des amas lointains. Une équipe du CEA, dirigeant le

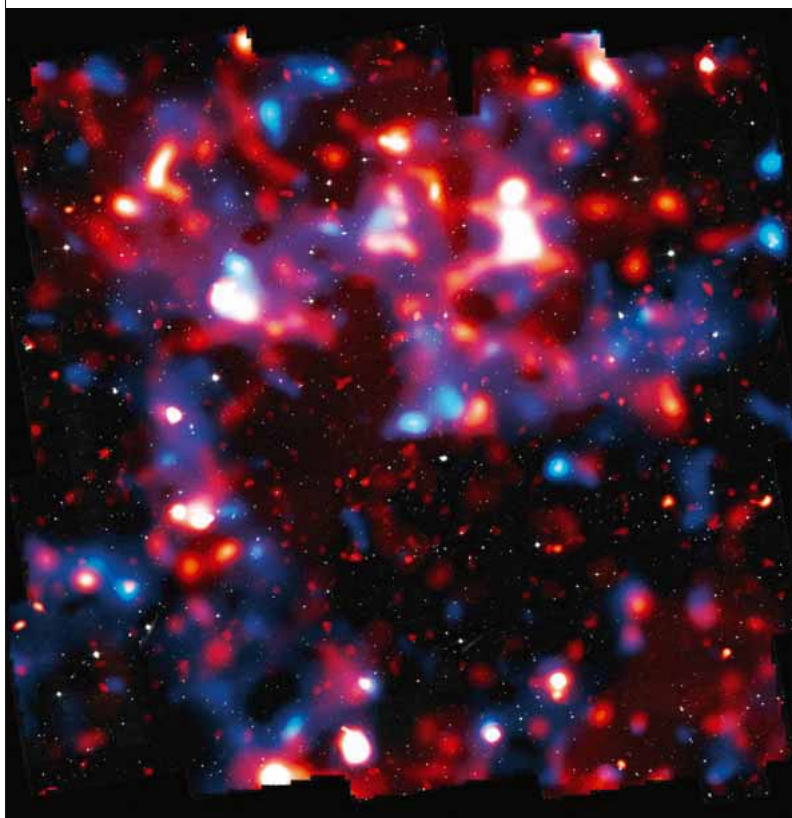


Figure 1. Image montrant les trois composantes observées avec le relevé COSMOS : la matière noire (en bleu), la matière lumineuse en rayons X vue par XMM-Newton (en rouge) et les étoiles et galaxies observées en lumière visible avec le télescope spatial Hubble (en blanc).

(1) L'Univers étant en expansion, les particules et objets s'éloignent tous les uns des autres. Sauf au sein d'un « objet », où la gravitation maintient les parties ensemble malgré l'expansion générale.

(2) Puisque l'Univers est en expansion, les sources lumineuses s'éloignent de l'observateur, et leur fréquence détectée semble diminuer avec le temps. Le **spectre d'émission** d'un objet est donc d'autant plus décalé vers les basses énergies qu'il est éloigné (c'est-à-dire que sa lumière est ancienne). Ce décalage spectral, noté z , donne une mesure de l'âge de l'objet émetteur.

programme « Sondage de la structure à grande échelle avec XMM », a ainsi découvert de nouveaux groupes et amas de galaxies à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière. L'amas le plus lointain connu à ce jour, XMMXCS 2215-1738, observé quand l'Univers avait un tiers de son âge actuel, a aussi été découvert avec XMM-Newton. Ces observatoires permettent non seulement de faire des images, c'est-à-dire de cartographier la distribution de densité du gaz, mais aussi de déterminer le **spectre** d'émission X en chaque point de l'amas, et donc d'établir une carte de température précise. Les astrophysiciens ont ainsi pu calculer comment la pression du gaz diminue du centre à la périphérie de l'amas. Quand ce dernier est à l'équilibre, les forces de gravitation dues à la matière noire contrebalancent la pression du gaz. Observant un échantillon d'amas à l'équilibre, des équipes du CEA et du **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE)** ont constaté que la distribution de la matière noire s'accorde remarquablement avec les prédictions des simulations numériques de formation des amas. Plus étonnant : ces observations donnent même des informations sur la nature de la matière noire. La distribution est en effet très piquée (étroite) au centre, ce qui exclut les modèles où les particules de matière noire interagissent fortement par des processus autres que la gravitation.

Une matière visible... mais incomprise

Si la formation et l'évolution des amas en tant que grandes structures de matière noire semblent bien comprises, ce n'est pas le cas pour le comportement de la matière visible, beaucoup plus complexe que celui de la matière noire. Les cartes de la température du gaz obtenues avec XMM-Newton et Chandra montrent que certains amas sont bien en train de fusionner (figure 2), conformément au scénario de formation hiérarchique. Elles exposent aussi toute la violence et la complexité de ce phénomène. Lors de la collision, l'énergie cinétique est dissipée en énergie thermique *via* la création d'ondes de choc mais aussi de **turbulences**. Les astrophysiciens constatent, dans certains amas en fusion, une **émission synchrotron** qui révèle la présence de particules **relativistes**. Les ondes de choc et la turbulence servent probablement aussi à l'accélération de ces particules.

Le gaz et la matière noire vont progressivement se stabiliser pour former un nouvel amas à l'équilibre plus massif et plus chaud. Cependant, l'observation de ces amas à l'équilibre montre que l'énergie du gaz est plus grande que prévue. Les astrophysiciens comprennent mal d'où provient ce surplus, différents processus outre la gravité pouvant modifier le bilan thermique du gaz. Celui-ci se refroidit par rayonnement. En revanche, les explosions de **supernovae** et les **noyaux actifs** dans les galaxies peuvent injecter de l'énergie dans le milieu intergalactique. L'évolution du gaz dans les amas est donc affectée par les galaxies. Inversement, l'évolution des galaxies dépend de leur environnement. Elle est différente pour les galaxies d'amas et pour les galaxies isolées.

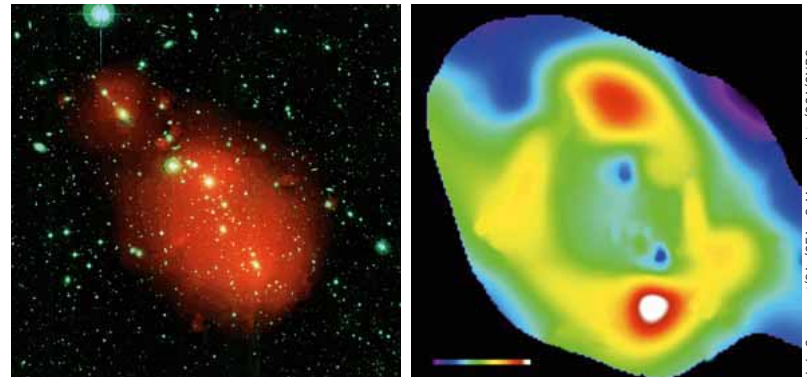


Figure 2.

L'amas de galaxies A2440. L'image composite de gauche montre les galaxies observées en lumière visible avec le télescope de 2,2 mètres de l'ESO – télescope MPG de l'observatoire de La Silla au Chili – (en vert), et le gaz chaud vu en rayons X par XMM-Newton (en rouge). L'image du gaz révèle que cet amas est en fait composé de deux amas plus petits, centrés sur les deux plus grosses galaxies, et d'un troisième groupe en haut à gauche. La carte de température (à droite) indique que les deux amas sont en train de fusionner : les régions plus chaudes (en jaune/rouge) correspondent à une onde de choc générée par leur rencontre.

Questions d'avenir

Quel est le rôle des processus autres que la gravité dans la formation des structures de matière visible ? Quelle est l'interdépendance de l'évolution aux différentes échelles, des galaxies aux grandes structures ? Ce sont les principales questions que doivent résoudre les astrophysiciens. L'astronomie en rayons X continuera à jouer un rôle essentiel. Les progrès de nouvelles techniques, comme la mesure de l'**effet Sunyaev-Zel'dovich**, de l'effet de lentille gravitationnelle, ou de l'émission en **infrarouge** des galaxies, permettront de sonder simultanément les amas à plusieurs **longueurs d'onde**, ce qui n'était jusqu'à présent possible que pour de petits échantillons. Le télescope spatial Herschel, lancé avec le satellite Planck par Ariane 5 en mai 2009, éclaircira l'effet de l'environnement sur la formation stellaire dans les galaxies. Le satellite Planck détectera, *via* l'effet Sunyaev-Zel'dovich, l'essentiel des amas massifs sur tout le ciel, qui seront ensuite étudiés en détail avec XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). L'observatoire européen en **ondes radio** LOFAR (*LOW Frequency ARray*) permettra de mieux comprendre l'accélération de particules dans les amas de galaxies.

Observer directement l'histoire des amas, depuis la formation des premiers groupes de galaxies, reste cependant hors de portée des satellites en rayons X actuels. C'est un des objectifs principaux des satellites de prochaine génération, comme IXO (*International X-ray Observatory*) proposé dans le cadre du programme *Cosmic Vision* de l'ESA. Le projet Euclid, également candidat à ce programme, utilisera la technique des lentilles gravitationnelles pour effectuer un relevé de la matière noire sur la moitié du ciel, et détecter directement les amas en tant que structures de matière noire (voir *Euclid, cartographe du ciel intergalactique*, p. 111).

> Monique Arnaud

Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)