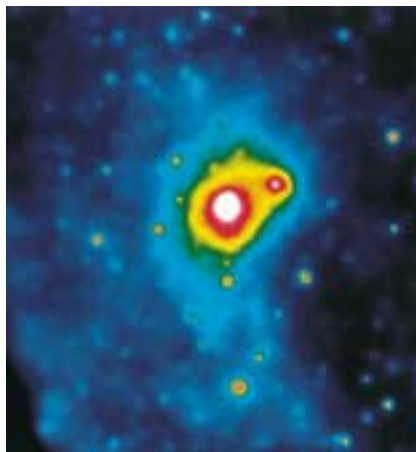
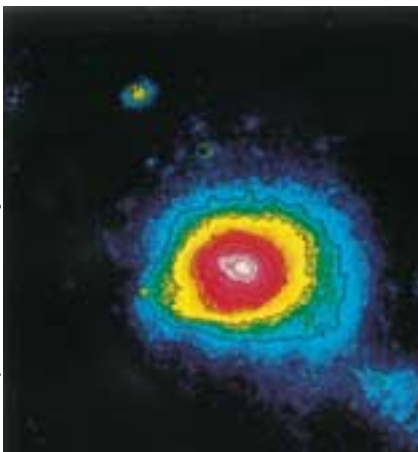




5. LES IMAGES EN RAYONS X des amas de la Chevelure de Bérénice (à gauche) et de la Vierge (à droite) montrent le gaz intergalactique chaud qui domine la partie lumineuse de ces structures. Le gaz est plus régulièrement réparti dans la Chevelure de Bérénice que dans l'amas de la Vierge. Ce dernier est vraisemblablement à une étape antérieure de son évolution.

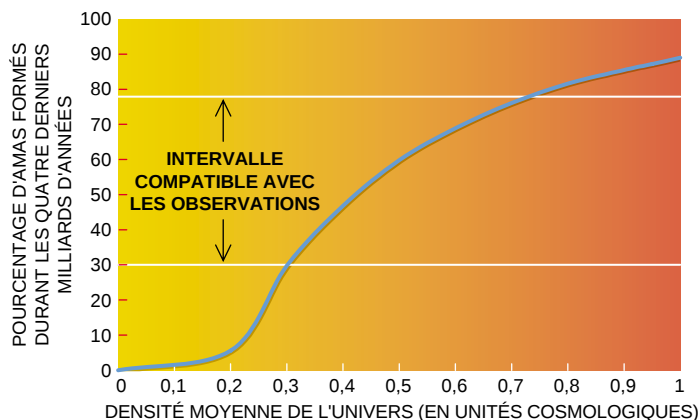
De l'évolution des amas à l'évolution cosmique

L'expansion de l'Univers a commencé lors du Big Bang, il y a environ 15 milliards d'années. Depuis cette époque, tous les corps qui ne sont pas liés les uns aux autres par la gravité ou par une autre force s'écartent. Toutefois, l'expansion cosmique se poursuivra-t-elle indéfiniment, ou la gravité de toute la matière de l'Univers suffira-t-elle pour l'arrêter? La réponse à cette question est difficile, car elle dépend du recensement minutieux de toute la matière de l'Univers, tâche ô combien délicate, notamment parce qu'une grande partie de cette matière est invisible.

Un recensement fondé sur l'étude de l'évolution des amas de galaxies est aujourd'hui possible. Au fil du temps, les amas croissent par coalescence, jusqu'à épuisement de la matière à leur «portée gravitationnelle». Plus il y a de matière dans l'Univers, plus ils croissent vite et plus ils deviennent gros (voir la figure). Si l'Univers possède suffisamment de matière pour s'immobiliser, moins de dix pour cent des

amas massifs présents aujourd'hui existaient voici quatre milliards d'années – et de nouveaux amas devraient encore naître et croître aujourd'hui. En revanche, si l'Univers ne contient qu'un quart de la masse nécessaire pour arrêter son expansion (ce qui correspond aux estimations actuelles), tous les amas massifs étaient déjà formés il y a quatre milliards d'années, et aucune croissance n'a eu lieu depuis.

L'observation de la vitesse d'évolution des amas favorise la seconde hypothèse : aujourd'hui, la plupart des amas ne grossissent plus. Ainsi, l'Univers poursuivra indéfiniment son expansion (sauf s'il existe de la matière aux propriétés physiques exotiques, telle une répulsion gravitationnelle qui varie au cours du temps). D'autres mesures récentes de l'expansion cosmique, fondées sur l'observation des supernovae lointaines et sur d'autres indicateurs, corroborent cette conclusion. Bien que le dossier ne soit pas clos, l'Univers semble ouvert.



Un troisième amas, Abell 1795, est à une étape encore ultérieure, plusieurs milliards d'années après une fusion. Cet amas est parfaitement régulier, et sa température quasi uniforme : l'amas a assimilé tous ses groupes et a atteint un état d'équilibre. On n'observe qu'une seule région de température particulière : au centre, la température est inférieure. Pourquoi? Parce que le gaz au centre est plus dense, et qu'un gaz dense émet des rayons X avec un meilleur rendement qu'un gaz ténu : lorsque le gaz est plus dense, il y a plus d'interactions, donc plus de freinage des électrons. Or, c'est du freinage que résulte le rayonnement X. Ainsi, si rien ne vient perturber ce gaz dense pendant deux ou trois milliards d'années, il rayonne la majeure partie de son énergie initiale et se refroidit.

Lorsque le gaz se refroidit, d'importantes quantités de matériau tiède s'accumulent – suffisamment pour former une nouvelle galaxie. Où est donc passée toute cette matière? Malgré les recherches, on n'a pas trouvé les poches de gaz tièdes qui se seraient formées et qui, moins denses, tomberaient vers le centre de l'amas. Pourtant, les cartes thermométriques révèlent que l'amas est en train de se refroidir (le centre est plus froid). La perte de chaleur a-t-elle commencé trop récemment pour que les zones tièdes soient visibles? La collision de groupes de galaxies empêche-t-elle la concentration du gaz refroidi en un point? Ces flots de refroidissement constituent un autre mystère non résolu.

Les structures grossissent

Ces trois amas d'Abell correspondent probablement à des stades par lesquels passent tous les amas lors de leur croissance. De temps à autre, des groupes de galaxies se joignent aux amas ; chaque groupe apporte du gaz chaud, des galaxies brillantes et de la matière sombre. La masse supplémentaire engendre des forces gravitationnelles plus intenses, qui chauffent le gaz et accélèrent les galaxies. La plupart des astronomes pensent que presque toutes les structures cosmiques ont grossi ainsi, par coalescence. Les amas d'étoiles ont fusionné pour former les galaxies, qui s'assemblent pour créer les amas de galaxies. Dans l'avenir, les amas fusionneront à leur tour pour construire des structures encore plus grandes. L'expansion de l'Univers

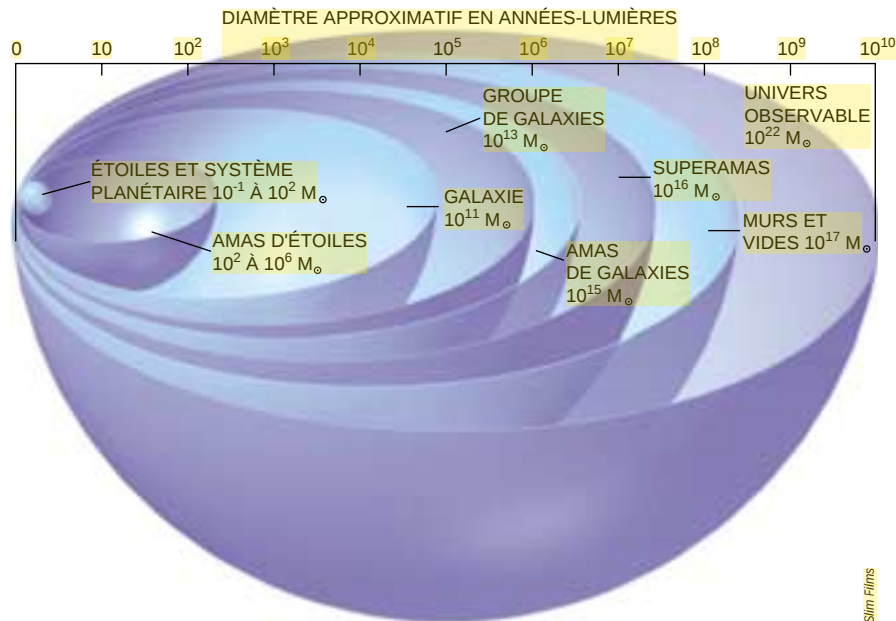
limite néanmoins cette croissance : les amas trop séparés ne fusionnent plus. Peut-être l'Univers approche-t-il cette limite.

À l'échelle de l'Univers, les amas cités jusqu'ici sont relativement proches. Les astronomes qui étudient l'évolution des amas à partir de quelques amas que nous observons sont comme des médecins qui exploreraient la croissance humaine à partir d'une seule photographie d'une foule. Avec un peu d'attention, on classe les personnes selon leur âge, et l'on déduit, qu'en général, les gens grandissent en vieillissant.

On pourrait aussi étudier la croissance humaine en examinant un ensemble de photographies, chacune ne contenant que des gens d'une classe d'âge, comme une photographie de classe d'école primaire, de lycée ou d'université. De même, les astronomes peuvent observer les amas à des distances de plus en plus grandes, qui correspondent à des époques de plus en plus reculées de l'histoire de l'Univers. Ainsi, on assemble des «photos de classe» d'amas dont les âges diffèrent. Grâce à cette approche, les astronomes travaillent sur un échantillon complet d'amas, plutôt que sur quelques amas individuels. En surpartie, les amas jeunes étant très lointains (jusqu'à 20 fois plus que les amas précités), leur étude détaillée est hors de portée et l'on doit se contenter de leurs propriétés moyennes.

L'un de nous (P. Henry) a appliqué cette méthode aux observations du satellite X ASCA. Il a découvert que les amas lointains, plus jeunes, sont plus froids que les amas plus proches, plus vieux. Avec le temps, les amas s'échauffent et deviennent plus massifs, preuve supplémentaire de la pertinence du modèle de croissance à partir de petites structures. Forts de ces observations, les chercheurs ont estimé la vitesse moyenne d'évolution des amas dans l'Univers. À partir de cette mesure, liée à l'évolution globale de l'Univers et à la nature de la matière sombre, les astronomes déduisent que l'expansion initiale de l'Univers ne s'arrêtera jamais (voir l'encadré de la page 48).

De nouvelles observations dans le domaine X identifieront peut-être le reste de la matière sombre dans les amas. D'ici la fin de l'an 2000, trois satellites X seront lancés : le satellite européen XMM (pour *X-ray Multi-mirror Mission*, soit «mission multi-miroir



6. LA HIÉRARCHIE DES STRUCTURES COSMIQUES s'étend des étoiles et des planètes à l'Univers tout entier. Les objets les plus grands qui sont maintenus par la gravitation sont les amas de galaxies, dont les masses atteignent 10^{15} fois la masse du Soleil (notée $M_{\odot}$). Il existe un niveau supérieur d'organisation, celui des superamas et des murailles (des murs de galaxies), mais ces structures ne sont pas liées par la gravitation. À des échelles plus grandes encore, l'Univers serait dépourvu de traits marqués. Les astronomes pensent que la plupart de ces structures se forment par agglomération progressive d'entités plus petites.

pour le rayonnement X»), le satellite américain AXAF (pour *Advanced X-Ray Astrophysics Facility*, soit «observatoire avancé pour l'astrophysique du rayonnement X») et le satellite japonais ASTRO-E.

D'autres observations, notamment dans l'ultraviolet lointain, complèteront ces études. L'ultraviolet lointain est un rayonnement électromagnétique d'énergie légèrement inférieure à celle du rayonnement X. Comme il est fortement absorbé par les gaz et les poussières de notre Galaxie, les astronomes pensaient que la plupart des amas ne seraient pas visibles à ces longueurs d'onde. Récemment, Richard Lieu, de l'Université d'Alabama, à Huntsville, Stuart Bowyer, de l'Université de Berkeley, et leurs collègues ont étudié cinq amas au moyen du satellite EUVE (acronyme d'*Extreme Ultra Violet Explorer*, soit «explorateur dans l'ultraviolet lointain», lancé en 1992).

Ils ont découvert que ces amas brillent beaucoup dans l'ultraviolet lointain. Cette découverte était aussi inattendue que la première détection des amas dans le domaine X, au début des années 1970. Bien qu'une partie de ce rayonnement provienne du même gaz qui engendre les rayons X, certains amas semblent contenir une autre source de ces rayonnements. Cette découverte récente reste encore inexpliquée.

S'agit-il d'une autre composante de la matière sombre? L'une des tâches des nouveaux satellites X sera l'identification de cette composante.

Les astronomes qui observent ces amas se sentent proches de Messier, qui s'efforçait d'apercevoir des taches lumineuses dans la constellation de la Vierge, sans connaître leur nature. Malgré les perfectionnements techniques, les amas restent bien mystérieux. Comme nous avons été aidés par nos prédécesseurs, nous plantons des jalons pour nos successeurs.

Patrick HENRY enseigne l'astronomie à l'Université d'Hawaii. Ulrich BRIEL et Hans BÖHRINGER travaillent à l'Institut Max Planck, à Garching (Allemagne).

Craig L. SARAZIN, *X-ray Emission from Clusters of Galaxies*, Cambridge University Press, 1988.

Clusters and Superclusters of Galaxies, sous la direction de A.C. Fabian, Kluwer Academic Publishers, 1992.

Florence DURRET, *Clusters of Galaxies*, Diderot Multimédia, 1994.

Jack O. BURNS, *Stormy Weather in Galaxy Clusters*, in *Science*, vol. 280, pp. 400-404, avril 1998.

Joshua N. WINN, *An X-rated View of the Sky*, in *Mercury*, vol. 27, n° 1, pp. 12-16, janvier / février 1998.