

de cette idée, est clairement en contradiction avec ce que nous observons.»

J'exposais une vision différente qui repose sur la matière noire. J'expliquais l'alignement très particulier des satellites galactiques en invoquant des structures cosmiques de matière noire qui s'étendraient bien au-delà du voisinage immédiat de la Voie lactée. Bien que certains, tel P. Kroupa, soient sceptiques et n'adhèrent pas à cette explication, des travaux récents, et notamment les miens, montrent que l'existence d'un réseau d'énormes filaments de matière noire expliquerait l'alignement surprenant des galaxies satellites dans le ciel.

L'existence de la matière noire au centre de ce débat a d'abord été postulée pour expliquer d'autres caractéristiques étonnantes des galaxies. Dans les années 1930, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky a voulu «peser» l'amas de la Chevelure de Bérénice, qui regroupe un millier de galaxies. Il a commencé par mesurer la vitesse des galaxies de l'amas. À sa grande surprise, il a trouvé des vitesses énormes : des milliers de kilomètres par seconde, assez pour que l'amas se disloque. Or la masse visible de l'amas ne pouvait pas assurer la cohésion de l'ensemble par sa force gravitationnelle. Zwicky en a conclu que l'amas devait être rempli d'une matière invisible qui contribue à la force gravitationnelle. Cette substance manquante a depuis été nommée «matière noire».

Matière manquante

Dans les décennies suivantes, les astronomes ont trouvé des indices de la présence de matière noire partout dans l'Univers, dans presque toutes les galaxies observées. Dans la Voie lactée, le mouvement des étoiles à la périphérie de la galaxie a été étudié. Comme les galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice, ces étoiles sont en déplacement trop rapide pour être retenues par la matière que nous voyons. Le même type d'analyse réalisé sur la dizaine de galaxies naines de la Voie lactée indique que leur abondance en matière noire serait encore plus grande.

L'ubiquité de ces indices a renforcé la conviction que la matière noire existe bien. En fait, la plupart des chercheurs en cosmologie estiment que la matière noire

■ L'AUTEUR



Noam LIBESKIND est astrophysicien. Il crée des modèles informatiques de l'Univers à l'Institut Leibniz d'astrophysique de Potsdam, en Allemagne.

LES SIMULATIONS DE POINTE
modélisent avec succès des milliards de particules dans un volume approchant la taille de l'Univers observable.

Un MOND sans matière noire ?

Pour Pavel Kroupa, la matière noire échoue à expliquer la distribution des galaxies naines. Il en déduit qu'elle n'existe pas. Selon le chercheur, les galaxies naines se forment dans un plan suite à la collision de deux galaxies. Par ailleurs, pour expliquer le profil des vitesses des galaxies, c'est-à-dire la vitesse des objets galactiques par rapport à leur distance au centre de la galaxie, P. Kroupa fait appel à la théorie MOND (*Modified Newtonian Dynamics*) proposée par Mordehai Milgrom. Cette théorie lui permet de se passer de matière noire. Mais le modèle de P. Kroupa rencontre aussi des difficultés : par exemple, les galaxies naines devraient contenir du gaz, ce qui n'est pas confirmé par les observations.

constituerait environ 80 pour cent de toute la matière présente dans l'Univers.

Cette abondance de la matière noire implique qu'elle joue un rôle crucial dans la façon dont l'Univers a évolué et s'est structuré au cours du temps. À partir des années 1970, les cosmologistes ont simulé l'histoire de l'Univers à partir de modèles numériques. L'idée est simple : l'ordinateur doit se représenter un volume imaginaire, placer des particules ponctuelles imaginaires (qui représentent des grumeaux de matière noire) sur un réseau pratiquement parfait à l'intérieur de ce volume, calculer l'attraction gravitationnelle exercée sur chaque particule par toutes les autres, déplacer chaque particule en fonction de la gravité exercée par les autres, et itérer ce processus sur 13 milliards d'années.

Ces approches se sont enrichies et ont gagné en complexité depuis les années 1970, mais le principe reste le même. Il y a 40 ans, les programmes informatiques ne pouvaient gérer que quelques centaines de particules. Aujourd'hui, les simulations de pointe modélisent avec succès des milliards de particules dans un volume approchant la taille de l'Univers observable.

Les simulations numériques du cosmos ont été très utiles pour étudier les galaxies isolément, mais elles ont révélé quelques énigmes. Par exemple, les modèles informatiques concluent que la matière noire du «halo» qui entoure la Voie lactée devrait attirer le gaz et la poussière et les agréger en grumeaux. Ces derniers devraient se contracter sous l'effet de la gravité, formant à terme des étoiles et des galaxies naines. Dans le cas de la Voie lactée, l'abondance de la matière noire implique que des galaxies naines devraient se former par milliers. Et pourtant, quand on observe le ciel nocturne, on n'en voit que quelques dizaines. Ce déficit, mis en évidence dès les années 1990, constitue le «problème des galaxies satellites manquantes».

Les astronomes ont avancé quelques solutions possibles à ce problème. Première hypothèse : il se peut que tous les satellites observés dans les simulations ne correspondent pas vraiment à des galaxies satellites réelles. Les plus petits grumeaux de matière noire pourraient ne pas avoir une masse suffisante (et donc ne pas exercer une attraction gravitationnelle

assez importante) pour capturer le gaz et former des étoiles. Ainsi, les galaxies satellites observées sont la partie visible d'un iceberg sombre: des centaines, voire des milliers, de satellites noirs, dépourvus d'étoiles, se cacheraient dans notre voisinage. Mais nous ne les voyons tout simplement pas.

Deuxième possibilité: même si de petits grumeaux de matière noire créent des étoiles, ces astres pourraient ne pas être assez brillants pour être détectés par les télescopes. Dans ce scénario, avec les progrès des techniques et la sensibilité croissante des télescopes, les astronomes espèrent trouver davantage de satellites. Et effectivement, ces sept dernières années, le nombre de galaxies satellites identifiées autour de la Voie lactée a doublé.

Par ailleurs, le disque de la Voie lactée nous empêche de voir certaines galaxies satellites. Le disque galactique est essentiellement un plan dense d'étoiles tellement brillantes qu'à l'œil nu, on a l'impression d'un fluide blanc continu (d'où l'adjectif «lactée»). Il serait difficile de trouver une éventuelle galaxie satellite située derrière

le disque: la lumière du disque noierait sa faible lueur.

Réunis, ces arguments ont, dans une large mesure, réglé le problème des satellites manquants pour la plupart des astrophysiciens. L'idée de la matière noire avait ainsi surmonté l'une de ses objections observationnelles les plus sérieuses. Mais l'alignement particulier des galaxies satellites pose une tout autre difficulté, qui laisse les chercheurs perplexes.

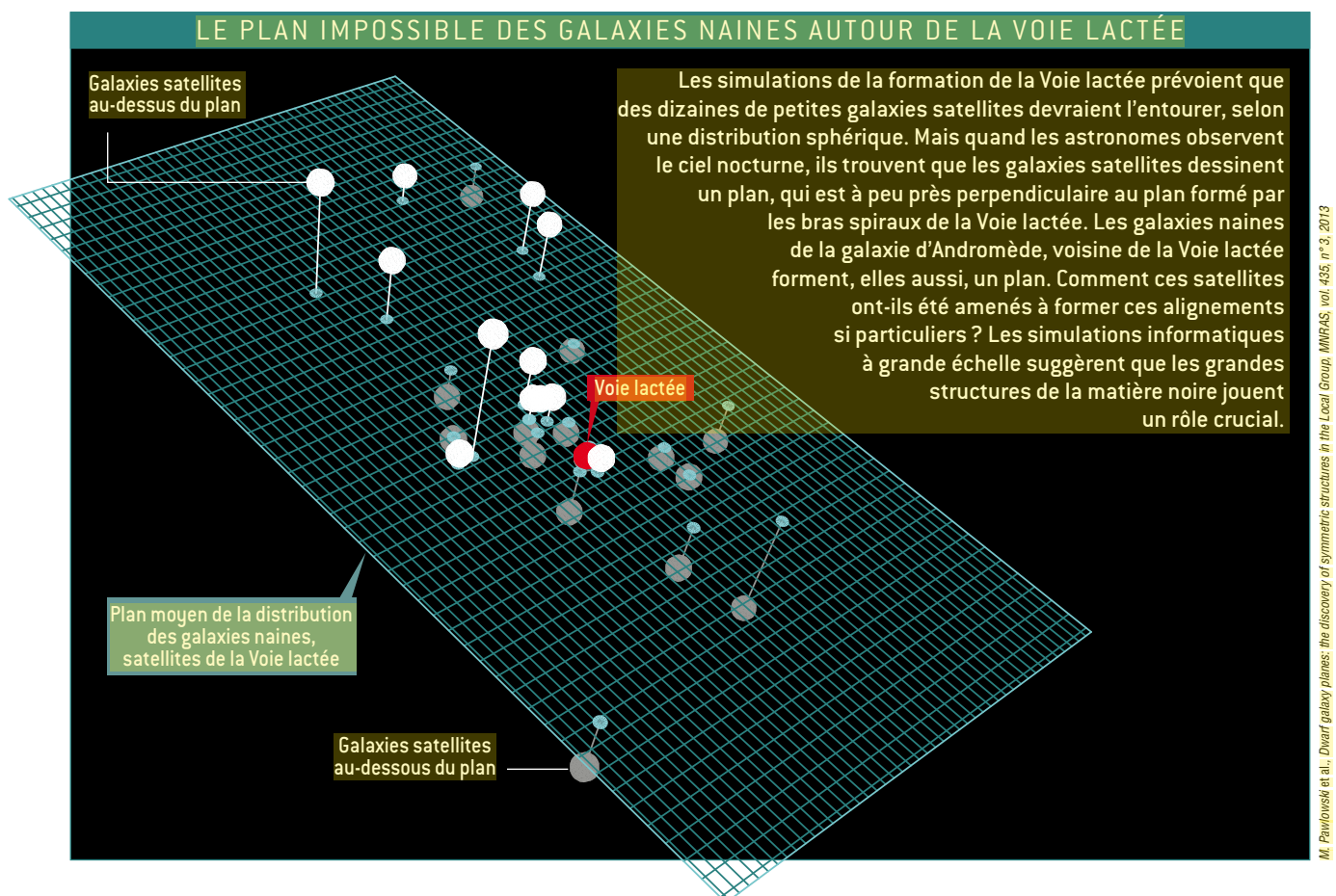
Les galaxies naines sèment le doute

Dans plusieurs articles de la fin des années 1970 et du début des années 1980, Donald Lynden-Bell, astrophysicien à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, a remarqué que de nombreuses galaxies satellites de la Voie lactée semblent se trouver dans un seul et même plan. Comment expliquer cette étrange répartition? En 2005, P. Kroupa et son équipe ont convaincu le monde entier que cet alignement ne pouvait pas être aléatoire. Si l'on suppose que les satellites suivent bien

une distribution sphérique et qu'environ une seule galaxie naine sur 100 est assez grosse et lumineuse pour être détectée, quelle est la probabilité que ces galaxies se retrouvent par hasard sur un même plan autour de la Voie lactée? La réponse a créé un séisme en cosmologie: la probabilité était inférieure à 1/1 000 000.

Si la matière noire guidait la formation des galaxies, affirmait P. Kroupa, les galaxies naines ne se trouveraient jamais toutes dans ce plan unique. La seule issue était d'admettre que les galaxies satellites de la Voie lactée ne se sont pas formées à la suite de l'agglomération de matière noire. La matière noire, disait-il, n'existe pas.

P. Kroupa proposait une alternative. Il suggérait que les satellites étaient des débris galactiques, les restes d'une ancienne galaxie qui serait passée il y a longtemps à proximité de la Voie lactée. De même qu'un astéroïde se disloque en laissant derrière lui un sillage de débris quand il entre dans l'atmosphère de la Terre, les satellites de la Voie lactée ont peut-être pour origine du matériau arraché à une galaxie plus grosse.



Pour étayer son hypothèse, P. Kroupa s'est appuyé sur certaines observations de galaxies en collision. Nombreuses dans l'Univers, elles présentent de longs ponts de matière, les « bras de marée ». Souvent, les bras de marée contiennent de petites galaxies naines qui se condensent à partir du flot de matière. Dans les bonnes conditions, la nature du déchirement garantit que le matériau arraché se retrouvera dans un plan mince, comme les satellites de la Voie lactée.

L'explication de P. Kroupa était élégante, simple, et surtout... controversée. Elle a vite été contestée. Tout d'abord, les étoiles des satellites de la Voie lactée se déplacent trop

vite pour que leur cohésion soit assurée par la seule matière ordinaire. Il doit y avoir de la matière noire pour les retenir, de même qu'elle assure la cohésion de la Voie lactée (en fait, les observations suggèrent que les galaxies satellites naines de la Voie lactée sont parmi les galaxies les plus riches en matière noire de l'Univers). Le scénario de P. Kroupa, où ces galaxies naines sont dépourvues de matière noire, n'explique pas pourquoi elles gardent leur cohésion (une piste possible est cependant proposée par la théorie MOND).

Ensuite, tout comme les automobiles sont abîmées lors d'un carambolage, les collisions entre galaxies à disques détruisent

leur structure. Le résultat d'une collision galactique est presque toujours un ramassis d'étoiles flou et informe. Or la Voie lactée a une structure bien nette et un disque assez mince. Nous ne voyons aucune indication qu'elle ait subi une fusion ou une collision dans un passé récent.

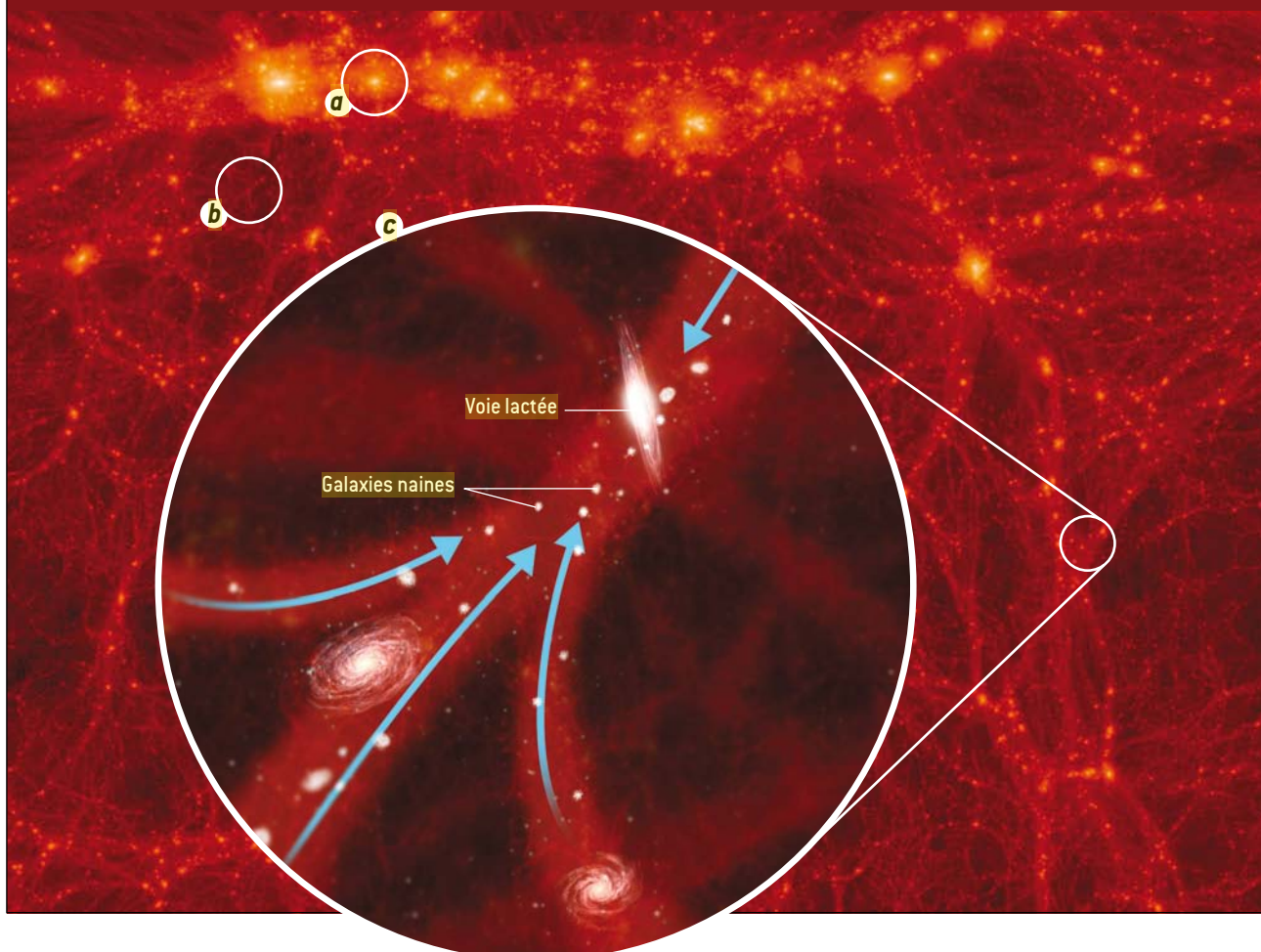
La toile cosmique sombre

Il existe une autre explication de l'alignement inhabituel des galaxies naines. Cette solution nous oblige à regarder plus loin dans le cosmos. Dans les simulations informatiques dont les premières datent des

DES AUTOROUTES COSMIQUES DE MATIÈRE NOIRE

Dans les quelque 13,7 milliards d'années qui se sont écoulées depuis le Big Bang, la matière noire qui imprègne l'Univers s'est condensée pour former une « toile cosmique », une énorme structure de filaments se croisant en des nœuds. La matière noire attire le gaz et la poussière avoisinants, et des galaxies massives telles que la Voie lactée se forment aux nœuds où la densité de matière noire est la plus grande [a]. Dans les filaments, la densité de la matière noire

est plus faible, et seules des galaxies naines plus petites s'y forment [b]. À mesure que le temps passe, l'intense force gravitationnelle exercée par les nœuds tend à attirer du matériau des filaments, telles les galaxies naines qui convergent vers de grandes galaxies [c]. Pour un observateur situé à l'intérieur de la Voie lactée, les galaxies naines apparaissent situées dans un plan perpendiculaire au disque galactique.



Ron Miller/Stein Gottlieb, Gustavo Yepes, Anatoly Klypin, Arman Khatunyan et Clus-Project.org

années 1970, on ne calcule pas seulement l'évolution des galaxies individuelles. On modélise des volumes énormes d'univers. Quand nous explorons ces simulations aux plus grandes échelles, nous constatons que les galaxies ne sont pas distribuées de façon aléatoire. Au contraire, elles ont tendance à se concentrer dans un réseau de filaments qu'on nomme la toile cosmique. Nous voyons clairement la structure prévue quand nous scrutons le ciel avec les relevés astronomiques à grande échelle.

La toile cosmique est constituée de matière noire et de magnifiques ensembles de millions de galaxies, s'étalant sur des centaines de millions d'années-lumière. Des filaments en forme de cigares relient ces ensembles. Entre les filaments, on observe d'immenses vides dépourvus de galaxies. Les grandes, telles que la Voie lactée, ont tendance à se situer aux nœuds de la toile où se rejoignent plusieurs filaments (*voir l'encadré page ci-contre*).

Quand j'étais doctorant à l'Université de Durham en Angleterre, j'élaborais des simulations informatiques de ces régions denses. Je travaillais en particulier sur un modèle qui retraçait la formation de la Voie lactée et de son voisinage au fil des 13 milliards d'années de son histoire cosmique. Lorsque j'ai apporté un tracé des résultats à mon directeur de thèse, Carlos Frenk, il a examiné les figures pendant un moment, a secoué les papiers, et s'est exclamé : « Laisse tomber tout le reste ! Les galaxies satellites que tu étudies sont toutes situées sur le plan impossible de Kroupa ! »

Notre modèle ne reproduisait pas les prédictions antérieures des simulations informatiques, qui se résumaient à un halo uniformément peuplé de galaxies satellites autour de la Voie lactée. L'ordinateur prédisait plutôt la formation d'un plan de satellites qui ressemblait beaucoup à celui observé par les astronomes. Nous sentions que nos simulations commençaient à percer le mystère du mécanisme par lequel les galaxies naines ont adopté une configuration plane.

« Pourquoi ne fais-tu pas remonter tes simulations dans le temps pour voir d'où viennent les galaxies naines ? », m'a suggéré C. Frenk. Nous disposions du résultat final ; maintenant, il était temps d'examiner les étapes intermédiaires de la simulation.

En inversant le déroulement de la simulation, nous avons constaté que les galaxies naines ne provenaient pas de

la région entourant directement la Voie lactée. Elles ne se formaient pas dans le voisinage de la galaxie, mais plus loin dans les filaments de la toile cosmique. Ces régions, plus denses que les zones vides environnantes, attirent la poussière et le gaz voisins et les amalgament pour former des galaxies naissantes.

Une fois ces galaxies naines formées, la gravité les attire en direction de la région voisine la plus massive – dans notre cas la Voie lactée. Parce que notre galaxie se trouve en un nœud où se rencontrent plusieurs filaments, les galaxies naines se déplacent le long du filament qui leur a donné naissance et accélèrent dans notre direction. En d'autres termes, les filaments de matière noire servent d'autoroutes cosmiques pour les galaxies naines. Quand nous regardons le ciel et que nous voyons les galaxies dans un même plan et allant dans la même direction, ce que nous observons n'est en fait que la circulation galactique qui arrive en face de nous.

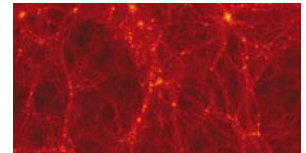
Un nouveau test

Certains scientifiques, comme P. Kroupa, restent sceptiques. Les modèles informatiques semblent reproduire les conditions observées autour de la Voie lactée avec suffisamment de précision, mais la théorie générale devrait aussi être capable de décrire le voisinage d'autres galaxies.

En janvier 2013, les astronomes cartographiant les environs de notre galaxie voisine, celle d'Andromède, ont trouvé un plan de galaxies naines satellites encore plus mince : ce plan a un diamètre d'un million d'années-lumière, pour une épaisseur de seulement 40 000 années-lumière. Cette nappe semble tourner exactement de la façon prévue par le scénario de P. Kroupa. Les simulations informatiques telles que la mienne, cependant, n'ont pas encore été capables de reproduire l'alignement des galaxies que nous voyons autour d'Andromède.

Mais les problèmes de la théorie de P. Kroupa demeurent : elle aussi est en désaccord avec certaines observations. L'histoire a montré que quand on se retrouve dans une telle impasse, les solutions définitives ne viennent qu'avec des données supplémentaires. Comme le faisait un jour remarquer Albert Einstein, « La nature n'a pas jugé devoir nous faciliter la découverte de ses lois. » ■

■ EN VIDÉO



Une simulation de la toile cosmique : www.ScientificAmerican.com/mar2014/cosmic-web

■ BIBLIOGRAPHIE

M. S. Pawlowski *et al.*, Dwarf galaxy planes : the discovery of symmetric structures in the Local Group, *MNRAS*, vol. 435(3), pp. 1928-1957, 2013.

N. I. Libeskind *et al.*, The preferred direction of infalling satellite galaxies in the Local Group, *MNRAS*, vol. 411(3), pp. 1525-1535, 2011.

N. I. Libeskind *et al.*, The distribution of satellite galaxies : the great pancake, *MNRAS*, vol. 363(1), pp. 146-152, 2005.