



d'investigation à un domaine jusqu'alors invivable. Les techniques géométriques, telle que l'utilisation de la parallaxe (on déduit la distance d'un objet à partir de son déplacement par rapport à un fond fixe quand on l'observe de deux positions différentes), ont par la suite trouvé leurs limites. De nouvelles méthodes ont été mises au point et les astrophysiciens utilisent aujourd'hui des étoiles telles que les céphéides ou les supernovæ de type Ia – des astres en train d'exploser –, pour déterminer les distances dans l'Univers.

Alors que ces chercheurs cartographiaient le cosmos, les théoriciens ont développé une description géométrique de l'Univers. Le modèle standard cosmologique, le modèle du Big Bang, décrit avec succès les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a près de cent ans. La «force de gravitation» y est décrite de façon géométrique dans un espace-temps courbe. Plus précisément, le mouvement d'un objet en chute libre est interprété dans la théorie d'Einstein comme un trajet qui suit le plus court chemin dans un espace-temps courbe. La géométrie de l'espace-temps définit les trajectoires des objets et, en retour, le contenu matériel de l'Univers déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et contenu matériel sont intimement liés dans les équations de la relativité générale.

En combinant l'observation précise de la lumière émise par les galaxies lointaines avec des mesures de distance, les cosmologistes ont découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies semblent s'éloigner les unes des autres, car l'espace-temps qui les contient s'étire. Plus étonnant, en observant des supernovæ très éloignées, les scientifiques ont découvert que l'expansion se fait à un rythme qui s'accélère.

Quelle est l'origine de ce phénomène? Une explication possible est la présence dans l'Univers d'une «énergie sombre», dont la nature reste inconnue, mais dont on peut déduire certaines

caractéristiques des observations astrophysiques. C'est cette question qui nous intéresse ici.

Avant d'aborder la question de la nature de l'énergie sombre, voyons comment les cosmologistes ont eu l'idée de son existence et comment ils ont estimé son abondance dans l'Univers. Toute substance influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Or l'analyse du fond diffus cosmologique – un rayonnement électromagnétique émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans – indique que l'Univers suit une géométrie proche de celle d'Euclide aux grandes échelles. Une telle propriété n'est possible que si le contenu de l'Univers présente une certaine densité moyenne d'énergie, dite «densité d'énergie critique».

UN PROBLÈME DE CONTENU

Par ailleurs, les astrophysiciens déduisent le contenu en matière ordinaire (dite «baryonique» et qui compose les planètes, les étoiles...) de l'étude de la formation des noyaux atomiques légers dans les premières minutes de l'Univers. Cette matière ne représente que 5% de la densité d'énergie critique (*voir Repères, page 6*). Ainsi, 95% du contenu de l'Univers est sous une forme inconnue.

Ce contenu mystérieux se manifeste néanmoins de façon indirecte par son influence gravitationnelle sur la matière baryonique. Les cosmologistes le séparent en deux composantes selon son comportement, soit aujourd'hui environ 25% de matière noire et 70% d'énergie sombre. Cette composition est maintenant confirmée par de nombreuses observations.

La présence de matière noire a d'abord été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière ➤

➤ baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle: la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire.

MESURER L'EXPANSION

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est due à Einstein en 1917, mais elle ne fut prise au sérieux que lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

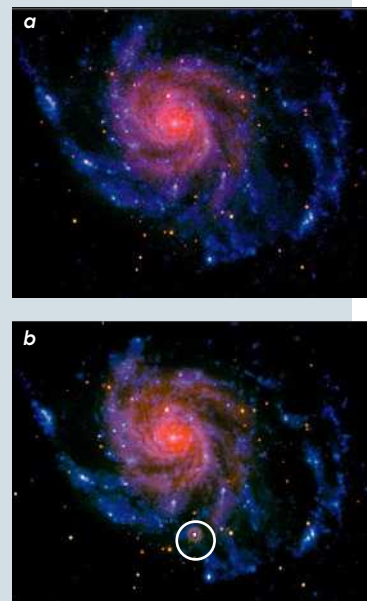
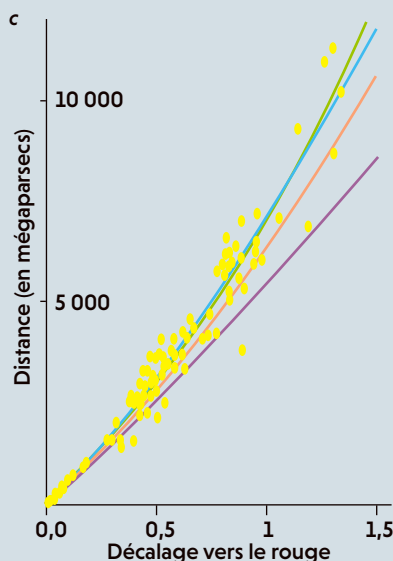
La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, quand on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était systématiquement décalé vers le rouge. Cette observation peut être interprétée par l'effet Doppler: la longueur d'onde d'un signal électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la «loi de Hubble», entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée.

Dans le cadre de la relativité générale, les observations de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers: c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est la constante de Hubble. Elle a été déterminée avec une précision de l'ordre de 1% et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par

LES CHANDELLES STANDARD

Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). De fait, elles servent de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable: une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (a et b). Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. Comme la quantité de lumière émise est connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi le décalage vers le rouge de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers. En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes

distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (c). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible: l'expansion était donc plus lente dans le passé.



Les mesures de la distance et de la vitesse d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches (telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b) vérifient la loi de Hubble linéaire (c). Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines (les courbes correspondent à différents modèles cosmologiques).