



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. Nous présenterons des pistes que les cosmologistes explorent, de l'énergie du vide liée à l'énergie sombre à des modifications des lois de la gravitation aux grandes échelles.

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 euclidienne 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.

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 cinq pour cent de la densité d'énergie critique. Ainsi, 95 pour cent 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 pour cent de

L'ESSENTIEL

■ En 1998, les cosmologistes ont découvert que l'expansion de l'Univers accélère.

■ Ce phénomène s'expliquerait par une « énergie sombre », qui représenterait 70 pour cent de la densité d'énergie de l'Univers.

■ L'énergie sombre pourrait correspondre à une constante cosmologique liée aux fluctuations quantiques du vide.

■ D'autres pistes sont explorées, comme la « quintessence » ou des modifications des lois de la gravitation.

ESO/T. Preibisch

matière noire et 70 pour cent d'énergie sombre (voir la figure 1).

La présence de matière noire a 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 (voir les articles de Volker Springel page 22 et de Richard Taillet page 30).

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont, comme nous le verrons, plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est née lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

Mesurer l'expansion de l'Univers

La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, lorsque l'on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était décalé vers le rouge de façon systématique. Ce résultat est dû à l'effet Doppler : la longueur d'onde d'un signal sonore ou 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 observa-

tions 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 nommé constante de Hubble. Il a été déterminé avec une précision de l'ordre de un pour cent 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 l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2 100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique), qui postule qu'il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats ; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

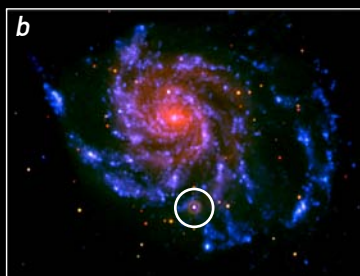
Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat. En effet,

LES SUPERNOVÆ DE TYPE IA POUR CARTOGRAPHIER L'UNIVERS

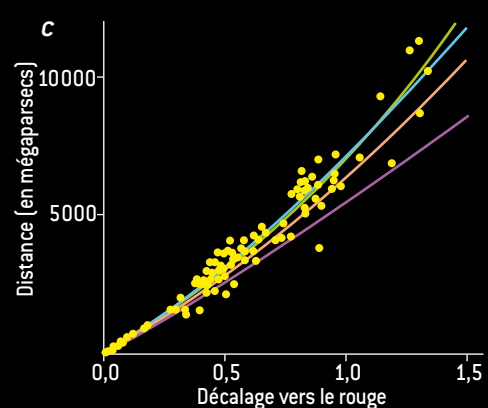
Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent 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).



NASA/Smith-Peter Brown, Université de l'Utah/Université de Hawaï