

lumière ou d'autres formes d'énergie. La théorie de la relativité générale relie ces propriétés fondamentales de l'Univers et décrit comment elles agissent sur le mouvement de la matière et sur la propagation de la lumière. Les prévisions astronomiques qui en résultent peuvent alors être confrontées aux observations.

Avant la publication de la théorie d'Albert Einstein, en 1916, et avant les premières observations de l'expansion cosmique, dans la décennie suivante, la plupart des astrophysiciens pensaient que l'Univers avait une taille constante. Même Einstein se méfia de ses équations lorsqu'il comprit qu'elles décrivaient un univers qui évoluait. Cependant les mesures des mouvements galactiques par Edwin Hubble et par d'autres ne laissèrent guère de doute : les galaxies faibles, parce que lointaines, s'éloignent de la Terre plus vite que les galaxies brillantes, proches ; ainsi, conformément aux équations de la relativité générale, l'Univers est en expansion, et les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des taches

de peinture à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Les astronomes ont déterminé les vitesses de récession des galaxies à partir du décalage des raies spectrales visibles vers des longueurs d'onde supérieures (le rougissement, ou décalage vers le rouge). Bien qu'il soit souvent attribué à l'effet Doppler, en vertu duquel une sirène qui s'approche paraît plus aiguë qu'une sirène qui s'éloigne, le rougissement cosmologique résulte de l'expansion de l'Univers, qui étire les longueurs d'onde de la lumière des galaxies. Le rayonnement des objets plus lointains, qui a voyagé plus longtemps, est plus décalé vers le rouge que le rayonnement des sources plus proches.

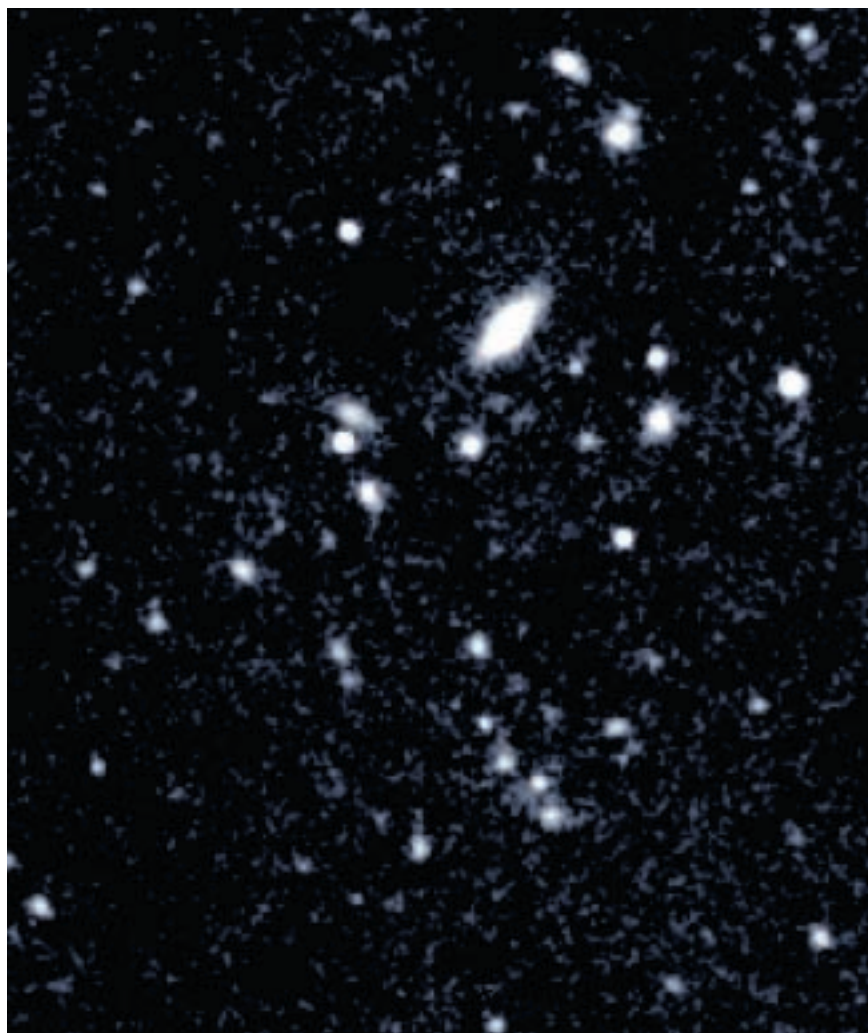
Dans les années 1930, à l'époque de Hubble, les spectromètres ne mesuraient le décalage vers le rouge que pour des galaxies brillantes. Or, pendant que la lumière de ces galaxies proches se propageait vers la Terre, l'Univers s'est très peu dilaté. Pour des changements aussi faibles, le décalage vers le rouge est proportionnel à la distance. Le

rapport de ces deux grandeurs est fixe : c'est la constante de Hubble, qui caractérise la vitesse actuelle d'expansion cosmique. Les astrophysiciens supposaient que, pour les galaxies plus lointaines, cette relation entre rougissement et distance serait modifiée, soit parce que la vitesse d'expansion a changé au cours du temps, soit parce que l'espace entre nous et ces galaxies est courbe. Ainsi, la mesure de cette modification était devenue l'un des grands objectifs de la cosmologie, mais il demeure difficile, car il requiert de déterminer les distances des galaxies extrêmement lointaines.

Pour estimer les distances des diverses galaxies, Hubble et les cosmologistes de son époque supposaient qu'elles ont toutes la même luminosité intrinsèque. Dans cette hypothèse, les galaxies les plus brillantes sont plus proches que celles qui apparaissent plus faibles. Toutefois, cette méthode a ses limites : la luminosité des galaxies est très variable ; de surcroît, pour les sources lointaines, la lumière met tant de temps à nous parvenir qu'elle dévoile des galaxies dans leur prime jeunesse, dont la luminosité intrinsèque pourrait être bien différente de celle de galaxies plus mûres, observées près de nous. Comme il est difficile de démêler ces modifications évolutives des effets de l'expansion, les astronomes ont longtemps cherché d'autres «chandelles de référence», des objets dont la luminosité intrinsèque serait la même, que ces objets soient proches ou lointains.

Pour être visibles à des milliards d'années-lumière de distance, ces balises doivent être très brillantes. Au début des années 1970, certains cosmologistes tentèrent d'utiliser les quasars, des sources extrêmement énergiques (probablement alimentées par des trous noirs qui avalent des étoiles et du gaz). Malheureusement, les quasars se révélèrent encore plus variés que les galaxies, et donc peu utiles pour l'arpentage de l'Univers.

Vers la même époque, d'autres astronomes commencèrent à utiliser des supernovae – des étoiles qui explosent – comme jalons pour les études cosmologiques. Cette approche fut d'abord controversée, car les supernovae étaient, aussi, très diverses. Toutefois, au cours des dix dernières années, les astronomes ont déterminé avec précision la luminosité intrinsèque d'un type de supernovae particulier, les supernovae de type Ia.



La mort d'une étoile

Une supernova de type Ia est l'explosion d'une étoile, c'est-à-dire une bombe thermonucléaire naturelle. L'étoile qui explose commence son existence sous la forme d'une sphère d'hydrogène, en équilibre. L'effondrement gravitationnel initial chauffe et comprime le gaz, ce qui déclenche des réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium, en carbone, en oxygène, en néon, et en d'autres éléments. L'énergie dégagée provoque l'agitation des atomes, ce qui équilibre la gravitation. Toutefois, lorsque le combustible nucléaire s'épuise, la pression devient insuffisante pour maintenir l'équilibre, et l'étoile s'effondre sur elle-même jusqu'à ce que son volume soit seulement de la taille de la Terre et sa densité un million de fois celle de la matière ordinaire. L'étoile est devenue une naine blanche.

La plupart de ces naines blanches se refroidissent et s'éteignent ainsi sans

briller. Toutefois, celles qui sont dans un système binaire (deux étoiles liées par la gravitation) peuvent aspirer la matière de leur compagne et devenir si denses qu'elles s'effondrent brusquement. La chaleur qui en résulte déclenche une explosion thermonucléaire qui détruit complètement la naine blanche, éjectant sa matière à des vitesses qui atteignent 10 000 kilomètres par seconde. La lueur de cette boule de feu en expansion met environ trois semaines pour atteindre son éclat maximum, puis décline plusieurs mois durant.

Les supernovae ont des luminosités variées, mais les explosions plus brillantes durent généralement plus longtemps que les plus faibles. Ainsi, en surveillant leur durée, les astronomes corrigent les différences et déterminent leur luminosité intrinsèque à 12 pour cent près. Au cours des dix dernières années, grâce aux études des supernovae de type Ia proches à l'aide de détecteurs modernes, ces éclairs sont

devenus les «chandelles de référence» les mieux étalonnées du ciel.

Ces explosions stellaires sont des événements rares dans les galaxies : il s'en produit un tous les 300 ans environ. Toutefois, l'Univers contient tant de galaxies que des supernovae suffisamment brillantes pour faire l'objet d'une étude explosent toutes les quelques secondes, quelque part dans le ciel. Il suffit donc aux astronomes de les trouver et de les étudier soigneusement. Depuis quelques années, deux groupes rivalisent d'effort : d'une part, notre groupe, surnommé le Groupe à grand z (z caractérise le décalage vers le rouge), a été créé en 1995 par Brian Schmidt, des observatoires australiens du mont Stromlo et de Siding Springs ; l'autre groupe, nommé Projet cosmologie et supernovae, lancé en 1988, est dirigé par Saul Perlmutter, du Laboratoire Lawrence Berkeley (voir l'encadré ci-contre).

Bien que les deux équipes soient indépendantes, elles profitent des mêmes progrès fondamentaux, essentiellement le déploiement de grands détecteurs de lumière sur des télescopes géants. Grâce à ces progrès, les astronomes produisent des images numériques d'objets faibles sur une grande partie du ciel, ce qui facilite l'analyse ultérieure. Ainsi, une caméra construite par l'Université du Michigan et par la Société *Lucent* a été placée au foyer du télescope de quatre mètres de diamètre de l'Observatoire de Cerro Tololo, au Chili ; une seule exposition de dix minutes produit une image qui couvre une surface égale à celle de la Lune et qui contient 5 000 galaxies.

Pour repérer les supernovae lointaines, il suffit donc de prendre des images de la même zone du ciel à quelques semaines d'intervalle et de rechercher, dans les galaxies lointaines, des différences de luminosité. Comme les détecteurs de lumière enregistrent avec précision le nombre de photons ayant atteint chaque élément d'image, une simple soustraction des deux images indique les différences. Quand tout se passe bien, la soustraction conduit à une image noire (au bruit près), où les seuls signaux intenses correspondent à des objets nouveaux ou variables, telles les étoiles variables, les quasars, les astéroïdes et, dans certains cas, des supernovae.

Les programmes informatiques enregistrent la position des nouveaux objets et tentent d'identifier ceux qui

Des supernovae pour la cosmologie

Entré dans la course aux grands décalages vers le rouge dès la fin des années 1980, le Projet cosmologie et supernovae a découvert, à ce jour, près d'une centaine de supernovae lointaines. Exploit remarquable si l'on rappelle qu'avant 1992 seulement une supernova lointaine avait été découverte. La découverte la plus spectaculaire eut lieu en octobre 1998 avec le télescope Keck de huit mètres de diamètre, situé à Hawaii. Pour la première fois, une supernova ayant un décalage vers le rouge supérieur à un était détectée. Autrement dit, cette supernova a explosé il y a dix milliards d'années, bien longtemps avant que notre Soleil ne se mette à briller !

Le Projet supernovae et cosmologie est une collaboration internationale d'une trentaine de physiciens et d'astronomes, qui mettent en communs leurs efforts et leurs moyens d'observation les plus performants pour détecter ces supernovae et en déduire la valeur des paramètres cosmologiques. En France, une douzaine de physiciens et d'astronomes du Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies (LPNHE) à Paris, de l'Ob-

servatoire de Meudon et d'autres institutions y participent.

De même que le Groupe à grand z , dont les résultats sont relatés dans l'article, le Groupe supernovae pour la cosmologie a annoncé durant l'été 1998 l'analyse de 42 supernovae à grand décalage vers le rouge. Si le nombre de supernovae diffère, les conclusions sont très semblables. D'abord, l'expansion de l'Univers serait infinie : l'Univers ne se recontractera jamais. Ensuite, et ceci est assurément spectaculaire, cette expansion serait, dans la période actuelle, en phase d'accélération et ce depuis environ quatre milliards d'années !

Ces résultats devront être confirmés et la recherche systématique de supernovae à grand décalage vers le rouge se poursuit activement. Pour ce faire, l'équipe française propose de combiner l'utilisation du télescope Canada-France-Hawaii pour la détection des supernovae et un suivi sur le télescope Keck et sur le Très grand télescope européen (VLT), récemment mis en service au Chili. Le mystère des paramètres cosmologiques sera-t-il bientôt résolu ?

Reynald PAIN, LPNHE, Paris