

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.

