



# Les supernovae très lointaines révèlent un Univers en expansion accélérée

Lucette Bottinelli

Des observations de supernovae dans des galaxies très lointaines ont été entreprises, il y a quelques années, par deux groupes indépendants de chercheurs pour cerner l'allure à laquelle le taux d'expansion de l'Univers varie, soit qu'il se ralentisse soit éventuellement qu'il s'accélère. Les deux groupes viennent d'aboutir à la même conclusion, tout à fait inattendue : la densité moyenne actuelle de masse dans l'Univers semble insuffisante à freiner l'expansion de l'Univers et celle-ci pourrait subir une accélération.

## Les paramètres fondamentaux de l'Univers

Trois paramètres fondamentaux gouvernent tous les modèles cosmologiques fondés sur la théorie de la Relativité générale. Ce sont : le taux d'expansion actuel caractérisé par la constante de Hubble  $H_0$ , qui représente le rapport entre la vitesse d'expansion et la distance ; la densité moyenne de matière dans l'Univers, caractérisée par le paramètre de densité  $\Omega_m$  (ce paramètre sans dimension exprime cette densité de matière en unité d'une certaine densité critique) ; la densité moyenne de l'univers associée à "l'autre forme d'énergie" éventuellement présente dans l'espace et caractérisée par le paramètre de densité  $\Omega_\Lambda$ . C'est le paramètre de densité global actuel,  $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$  qui détermine la géométrie de l'espace.

Le paramètre sans dimension  $\Omega_\Lambda$  représente physiquement ce que l'on appelle "la constante cosmologique  $\Lambda$ ". Une telle constante, initialement introduite par Einstein pour rendre compte d'un Univers qu'il croyait alors statique, puis abandonnée par souci de simplicité, quand les observations démontrèrent que l'Univers est en expansion, implique l'existence d'un effet qui s'oppose à la gravitation. On montre qu'une constante cosmologique  $\Lambda$  positive est équivalente à un terme de pression négatif, dû à la densité d'énergie du vide, qui

serait constante dans le temps et dans l'espace. L'effet d'une constante cosmologique non nulle est donc à la fois de participer à la courbure de l'espace et de tendre à accélérer l'expansion de l'Univers. C'est cette interprétation qui paraît être l'explication la plus plausible des récentes observations de supernovae très lointaines.

## A la recherche de supernovae de type Ia à grand décalage spectral

La première équipe américaine de Berkeley, autour de Saul Perlmutter, a développé depuis une dizaine d'années une stratégie d'observation destinée à découvrir des supernovae de type Ia (SNIa) avant qu'elles aient atteint leur maximum de lumière, puis à les observer avec la meilleure efficacité pour obtenir de bonnes courbes de lumière. L'équipe a rassemblé à ce jour les courbes de lumière et les spectres de 80 supernovae, de décalage spectral relatif  $z$  allant de 0,18 à 0,83 (on rappelle que  $z$  représente le rapport entre le décalage en longueur d'onde observé pour une raie spectrale de longueur d'onde au repos  $\lambda_e$ , et cette longueur d'onde  $\lambda_o$ ). La seconde équipe s'est organisée à l'échelle mondiale en 1995 autour de Brian Schmidt, de l'Observatoire australien du Mont Stromlo. Elle vient de publier un travail fondé sur la découverte de 16 supernovae de type Ia, dont

trois ont un décalage spectral de l'ordre de 0,5 et une quatrième un décalage spectral record égal à 0,97.

Ces supernovae ont l'immense intérêt d'avoir à leur maximum une très grande luminosité, ce qui les rend observables à de très grandes distances ; cette luminosité au maximum de lumière est en outre pratiquement toujours la même ou, dans une seconde approximation, légèrement variable d'une supernova à l'autre, la variation étant corrélée à des caractéristiques identifiables de la courbe de lumière. Par contre, elles se produisent rarement : moins d'une fois par siècle dans une galaxie donnée. Et l'événement doit être saisi rapidement quand il se produit : la supernova atteint son maximum en quelques semaines, puis décline à l'échelle du mois.

La stratégie de découverte de la première équipe a donc été organisée de la façon suivante. Dans une première étape, on prend une centaine de clichés avec le télescope de 4 mètres de l'Observatoire interaméricain de Cerro Tololo. Chacun d'eux comporte plus d'un millier de galaxies de grand décalage spectral. Trois semaines plus tard, on fait une nouvelle photographie des mêmes champs, puis on effectue une soustraction automatique de chacun des champs obtenus à 3 semaines d'intervalle, ce qui met immédiatement en évidence toute source de lumière apparue sur le second champ. On observe tout de suite le spectre de ces sources au moyen du télescope Keck. Seules sont retenues les supernovae dont le spectre est caractéristique de la classe des supernovae de type Ia. Les supernovae de grand décalage spectral sont suivies régulièrement, aussi longtemps qu'elles restent observables, au moyen de télescopes variés, et en deux couleurs, de façon à connaître - et corriger - les effets d'extinction. La seconde équipe travaille de façon assez similaire ; l'une et l'autre ont accès au télescope spatial Hubble lorsqu'elles découvrent des supernovae de très grand décalage spectral.

Au total, il faut noter que ces observations sont le fruit de campagnes coordonnées internationales mettant en jeu, outre le télescope spatial Hubble, de nombreux grands télescopes au sol. On pourra trouver des informations sur les programmes des équipes en question en

interrogeant les sites internet suivants : <http://www-supernova.lbl.gov/> ; <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>.

### Le diagramme de Hubble

Le diagramme de Hubble classique dans lequel on porte la distance  $d$  d'une galaxie en fonction de son décalage spectral  $z$  (en coordonnées logarithmiques) se présente sous la forme d'une droite qui traduit la loi de Hubble. Si les astres utilisés ont tous la même puissance intrinsèque (ou magnitude absolue  $M$  en échelle logarithmique), on peut lui substituer un diagramme où l'on remplace le logarithme de la distance par la magnitude apparente  $m$  (on rappelle que :  $m - M = 5 \log d + 25$ , où  $d$  est exprimé en Mégaparsecs).

Le fait que les SNIa aient toutes la même magnitude absolue à leur maximum implique une relation linéaire de la forme :  $m(\text{max}) = 5 \log z + \text{constante}$ , entre  $m(\text{max})$ , la magnitude apparente au maximum, et  $\log z$ . Cette relation est obtenue en remplaçant  $d$  par  $cz/H_0$ , selon l'expression classique de la loi de Hubble. Cependant pour des valeurs de  $z$  élevées, il n'est plus licite d'utiliser cette forme simple et la magnitude apparente théorique  $m$  d'une source donnée (avec  $M$  et  $z$  fixés) va dépendre du modèle d'Univers caractérisé par les paramètres cosmologiques ( $H_0$ ,  $\Omega_m$ ,  $\Omega_\Lambda$ ) dont il a été question précédemment.

En pratique, les différents modèles prédisent des valeurs de  $m$  distinctes de l'ordre de une magnitude au plus, seulement au-delà de  $z = 0,46$  environ. Enfin, pour une classe de sources homogènes, c'est-à-dire de même magnitude absolue, comme le sont les SNIa à leur maximum, on peut prévoir la relation entre  $m(\text{max})$  et  $\log z$  (c'est-à-dire le diagramme de Hubble) pour les SNIa de tout  $z$ , selon les modèles d'Univers ; ces relations montrent que  $m(\text{max})$  augmente quand  $\log z$  augmente (une supernova, de puissance intrinsèque constante à son maximum, apparaît d'autant plus faible qu'elle est éloignée), en suivant une variation qui dépend du modèle cosmologique adopté. On peut donc concevoir que l'on puisse contraindre les modèles en comparant le diagramme de Hubble observé jusqu'à des grands  $z$ , aux prédictions théoriques.

### Les résultats récents sur les SNIa à grand décalage

Les deux équipes ont découvert des supernovae de type Ia de grand décalage spectral. Une toute dernière information fait état de la découverte d'une détection à un décalage  $z = 1,12$ . Plus d'une quarantaine de supernovae sont disponibles avec  $z$  compris entre 0,3 et 1. Le diagramme de Hubble des supernovae avec  $z$  compris entre 0,01 et 0,1 indique bien une relation linéaire comme prévu. Par contre, pour les supernova à grand  $z$ , l'écart à la linéarité est clairement décelable.

Si l'on part de l'idée la plus simple, à savoir que la gravitation est seule à agir ( $\Lambda = 0$  et donc  $\Omega_\Lambda = 0$ ), on s'attend à ce que le diagramme de Hubble observé soit situé dans le domaine des modèles qui correspondent à  $\Lambda = 0$  et à l'éventail des valeurs plausibles du paramètre de densité  $\Omega_m$ , et donc en-dessous de celle de ces courbes qui correspond à la plus faible valeur admissible de  $\Omega_m$ . Or l'un et l'autre des deux groupes obtiennent des observations à grand  $z$  qui semblent localisées au-dessus d'une courbe limite supérieure, correspondant au cas extrême d'un univers vide, avec  $\Omega_m = 0$ . Même en supposant la densité de masse beaucoup plus faible que les valeurs actuellement admises, il semble donc nécessaire d'admettre l'existence d'une constante cosmologique non nulle.

Les deux groupes concluent que la solution ( $\Omega_m = 1$  ;  $\Lambda = 0$ ) qui avait jusqu'ici la faveur des théoriciens est totalement exclue. Les théoriciens adoptaient cette solution parce qu'ils faisaient le choix de l'inflation, sans constante cosmologique ( $\Omega_0 = 1$  avec  $\Omega_\Lambda = 0$  ; donc  $\Omega_m = 1$ ) c'est-à-dire que le paramètre de densité global  $\Omega_0$  était assimilé à  $\Omega_m$  sans aucune contribution due à une constante cosmologique. Si l'on continue à adopter l'inflation, la meilleure solution correspondant aux observations est de l'ordre de  $\Omega_m = 0,25$  et  $\Omega_\Lambda = 0,75$  ; cela correspond à une constante cosmologique non nulle et à un paramètre de décélération négatif, ce qui implique une accélération de l'expansion.

A suivre...

