

SUPERNOVAE ET ARPENTAGE DE L'ESPACE

**Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE
CEA-Saclay**

**Festival d'Astronomie de Fleurance
Août 2005**

Certaines étoiles explosent et deviennent des supernovae. Lors de l'explosion, la lumière émise peut égaler celle de l'ensemble de la galaxie qui hébergeait l'astre. Observées sur de très grandes distances, les supernovae peuvent, par conséquent, fournir des informations sur l'état de notre univers à des époques très lointaines.

I — Vie et mort d'une étoile

Les étoiles naissent dans la plus grande humilité, masquées par d'immenses cocons de poussière qui les protègent des regards indiscrets. Tout comme la rose de Saint-Exupéry, elles ne dévoilent leur visage qu'une fois finement apprêtées. S'échappant de leur nid douillet, ces boules de gaz en fusion brillent alors de mille feux. Mais si la naissance des étoiles semble se produire toujours selon le même rituel, il n'en est rien pour les fins tragiques qui attendent certaines d'entre elles.

Les étoiles les plus massives, celles qui à leur naissance affichent fièrement un poids au moins 10 fois supérieur à celui de notre soleil, sont les plus gourmandes. Une telle étoile brûle inconsidérément l'hydrogène qui la constitue et évolue à un rythme effréné. La voilà qui enfle, se transformant en géante rouge et avale dans son élan tout ce qui se trouve dans son voisinage. Notre soleil, remplacé par une telle géante, engloberait les planètes de Mercure jusqu'à Jupiter ! Puis, dure rançon de cette gloire éphémère, la partie centrale de ce monstre stellaire se durcit, fabriquant des éléments toujours plus lourds. L'hydrogène devient hélium, puis carbone, oxygène, néon, magnésium, silicium, soufre et enfin fer. À ce stade de son évolution, plus aucune réaction nucléaire ne lui permet de continuer sa vie trépidante. Dans l'éternel combat entre la gravitation qui tend à contracter l'étoile et la pression de radiation provenant des réactions nucléaires en son sein et qui au contraire tend à augmenter sa taille, la gravité prend le dessus. Agée de quelques millions d'années seulement, l'étoile est vouée à une mort certaine, des plus violentes. En une fraction de seconde, son cœur de fer s'effondre sous sa propre gravité, passant d'une sphère de 2000 km de rayon à un bloc de 30 km de rayon, d'une densité prodigieuse. Une cuillère à café remplie de cette matière pèserait autant que l'ensemble de la population terrestre ! Les couches externes de l'étoile, précipitées sur ce bloc dense, rebondissent brutalement et provoquent l'éclatement de l'étoile. L'onde de choc

issue de cette explosion traverse en quelques jours les 700 millions de kilomètres sur lesquels s'étend encore ce qui reste de la défunte géante. Une supernova vient d'exploser, prosaïquement appelée par les astronomes une supernova gravitationnelle ou supernova de type II.

Une étoile moins massive, semblable à notre soleil ou plus légère encore, fait preuve de plus de discrétion, à première vue tout au moins. Menant une vie sans soubresaut durant des dizaines de milliards d'années, elle évolue lentement et enfle après avoir consommé une grande partie de son hydrogène, devenant à son tour une géante rouge, environ 200 fois plus grande que notre soleil (bien loin du monstre décrit précédemment). Trop faible pour retenir le gaz en sa périphérie, l'étoile laisse échapper dans le milieu interstellaire d'immenses voiles de matière. Illuminé par l'éclat résiduel de l'étoile, ce gaz éparpillé donne à l'étoile une apparence diffuse et floue, d'où le nom de nébuleuse planétaire qu'elle adopte à ce stade. En l'absence de carburant nucléaire en fusion pour s'opposer à l'attraction gravitationnelle, le cœur de l'étoile se contracte peu à peu ; l'étoile s'éteint, et reste à jamais une naine blanche, corps froid et inerte à peine de la taille de la terre. Pour l'éternité ? Sauf lorsque l'étoile se trouve en système binaire, et ce n'est pas rare ! La plupart des étoiles sont en effet sociables et préfèrent la vie de couple à celle de célibat ! Selon les conditions de distance et d'âge relatif entre les deux compagnes, la naine blanche peut continuer à évoluer. Arrachant de la matière à son partenaire stellaire, elle s'épaissit et atteint bientôt le poids critique de une fois et demi celui du soleil, poids auquel les réactions nucléaires redémarrent ! La naine blanche, toute à sa vie paisible et monotone, n'était pas préparée à affronter un tel bouleversement. La combustion s'emballe, l'étoile explose et est entièrement désagrégée. Cette explosion prend le nom de supernova thermonucléaire ou supernova de type I, plus lumineuse encore que la supernova gravitationnelle. La supernova de type I peut briller comme des dizaines de milliards de soleils, autant que toute une galaxie.

II — Quelques supernovae historiques

Ces feux d'artifices stellaires demeurent des événements fort rares, parce que les étoiles très massives sont peu nombreuses, parce que les étoiles légères vivent très longtemps avant de devenir des naines blanches, et parce que les conditions requises pour devenir une supernova de type I sont extrêmement précises. On estime la fréquence de ces événements à environ un par siècle et par galaxie. Et ne sont visibles à l'œil nu que ceux qui se produisent dans notre propre galaxie, la Voie Lactée.

Les astronomes de l'Antiquité avaient constaté que si la plupart des étoiles étaient immuables, tant en brillance qu'en position dans le firmament, un nouvel astre (identifié aujourd'hui comme une comète ou une supernova) pouvait néanmoins apparaître soudain, brillant quelques jours pour disparaître ensuite à jamais. Ces étoiles nouvelles étaient sans nul doute des présages de la plus haute importance qui ont été soigneusement consignés dans les archives des astrologues, en particulier celles de la cour impériale chinoise. Les supernovae étant néanmoins fort rares, seules 8 ont été répertoriées en 2000 ans, les 3 dernières ayant explosé en 1054, 1572 et 1604. La plus récente visible à l'œil nu fut une supernova se produisant en 1987 dans le grand nuage de Magellan, petite galaxie satellite de la Voie Lactée.

D'après les récits historiques, l'explosion la plus spectaculaire est celle de la supernova de juillet 1054. La nouvelle étoile apparue dans la constellation du Taureau est décrite par les

Chinois comme six fois plus brillante que Vénus et aussi lumineuse que la pleine lune. Si remarquable était cette « étoile invitée », comme l'appelaient les Chinois, qu'il était possible de la voir en plein jour pendant près d'un mois et la nuit pendant près de 2 ans. Puis l'« invitée » disparut. Étrangement, alors que les Chinois décrivent cette explosion comme un prodigieux spectacle céleste, aucun écrit européen ne relate le phénomène. En Amérique, par contre, des pictogrammes laissés par les Indiens dans une grotte à White Mesa et sur un mur de Navajo Canyon en particulier permettent clairement d'identifier la supernova, grâce à sa position par rapport à la lune et aux constellations. La supernova fut oubliée pendant plus de 6 siècles, jusqu'à l'avènement des premiers télescopes. En 1758, alors qu'il scrutait le ciel à la recherche de comètes, Charles Messier remarqua une nébuleuse spectaculaire, sans mouvement apparent. La nommant M1, il en fit le premier élément de son fameux « catalogue des nébuleuses et amas d'étoiles ». Ce n'est qu'au début du XX^{ème} siècle que cette superbe nébuleuse fut associée à l'explosion de 1054. Mieux connu aujourd'hui sous le nom de « nébuleuse du Crabe », étalon des observations dans le domaine des rayons X, gamma ou radio, le résidu de l'explosion offre aujourd'hui la délicate image de superbes voiles de gaz multicolores.

Ignorant à cette époque l'existence de supernovae, les écrits chinois n'ayant encore franchi les frontières, en rentrant chez lui un soir de 1572, Tycho Brahe rédigea le rapport suivant intitulé *Stella Nova* : « Le 11 novembre dans la nuit après le crépuscule, je contemplais les étoiles. Je notai alors qu'une étoile nouvelle et inhabituelle, surpassant les autres en brillance, étincelait presque à la verticale de ma tête ; et comme depuis ma plus tendre enfance je connaissais parfaitement toutes les étoiles des cieux, il m'apparut évident que jamais il n'y avait eu d'étoile en cet emplacement du ciel, pas même la plus petite, sans parler d'une aussi visible et brillante que celle-ci. J'étais si surpris par cette vision que je n'eus pas honte de douter de mes propres yeux. Mais constatant que d'autres, si on leur indiquait l'endroit, y voyaient bien une étoile, mes doutes furent dissipés. Un miracle certainement, comme on n'en a jamais vu auparavant, à quelque époque que ce soit depuis le début du monde. »

Quant à la supernova de 1604, découverte par l'astronome Johannes Kepler, elle fut utilisée par Galilée comme preuve contre le dogme aristotélicien profondément ancré dans les croyances depuis le XII^{ème} siècle disant que le paradis n'avait jamais changé.

III — La quête actuelle

Si les premières supernovae furent découvertes au hasard des observations du ciel nocturne par de grands astronomes comme Tycho Brahé ou Johannes Kepler, si jusque dans les années 1990 des astronomes amateurs comparaient encore à l'œil des clichés du ciel pris à plusieurs mois d'intervalle dans l'espoir d'y découvrir un nouvel objet céleste, les supernovae mises à jour par les expériences actuelles proviennent d'une procédure qui n'a plus rien d'artisanal. L'importance des supernovae comme outil permettant l'étude de notre univers a en effet motivé au niveau international des équipes de physiciens à se plonger dans la recherche systématique de ces phénomènes, non plus seulement ceux de la Voie Lactée ((la saisie en serait par trop succincte) mais également ceux explosant dans les autres galaxies. L'expérience franco-canadienne SNLS (SuperNova Legacy Survey) est là pour en témoigner.

L'étude est menée depuis l'observatoire Canado-Franco-Hawaïen situé au Mauna Kéa, à Hawaï, à 4205 m d'altitude. C'est là que se trouve depuis 2 ans la plus grande caméra numérique au monde, Megacam, avec ces 360 millions de pixels partagés entre 40 CCDs.

Placée au foyer d'un télescope de 4 m de diamètre, cette caméra couvre en un seul cliché une surface du ciel grande comme quatre fois la surface de la lune. Les supernovae de type I ne se produisant qu'au plus une fois par siècle et par galaxie, la grande surface couverte par Megacam permet au groupe SNLS de surveiller simultanément près de 100 mille galaxies et d'être ainsi le témoin potentiel de nombreuses explosions stellaires. Au plus profond de la nuit, pendant les deux semaines qui entourent chaque nouvelle lune, le télescope pointe son nez vers une même région du ciel afin de mettre en évidence, par comparaison entre les images de la nuit et celles provenant des nuits antérieures, l'apparition d'éventuelles explosions d'étoiles. Simultanément, les courbes de lumière (évolution de l'intensité lumineuse en fonction du temps) de tous les objets célestes contenus dans le champ de vision sont complétées, nuit après nuit. Menant cette étude sur 5 années consécutives, les physiciens espèrent ainsi recenser environ 700 supernovae pour en tirer des conclusions sur la composition de l'univers au travers des âges et confirmer les premiers résultats qui ont bouleversé la communauté astrophysique et fait la une des médias : l'accélération irrémédiable de l'expansion de notre univers, contraire à toutes les théories énoncées jusque là.

L'étude ne s'arrête toutefois pas à la découverte de nouvelles sources de lumière. Grands nombres d'objets célestes peuvent en effet tenter de simuler le signal attendu : certaines étoiles présentent naturellement des fluctuations de leur luminosité, des galaxies peuvent soudain émettre des flambées de lumière, tandis que des astéroïdes peuvent traverser le champ de vision et apparaître le temps d'une nuit sur les clichés soigneusement étudiés. Afin de discerner les supernovae potentielles de ces artefacts indésirables, une analyse automatique isole les candidats les plus prometteurs que les physiciens examinent ensuite minutieusement pour extraire ceux qui semblent correspondre aux supernovae recherchées. Les candidats sélectionnés font alors l'objet d'une nouvelle observation auprès des plus grands télescopes actuellement en fonctionnement, ceux comportant un miroir de 8 m de diamètre, afin d'en extraire le spectre (distribution de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde). Ces mesures complémentaires présentent deux avantages. Non seulement elles confirment le type de la supernova (seules les supernovae de type I étant utilisées dans cette étude), mais elles permettent également d'en déterminer le « décalage spectral » dû à l'expansion de l'univers, qui indique le rapport entre la taille de l'univers lors de l'explosion de la supernova et sa taille actuelle. À cette information s'ajoute celle qui provient de la luminosité apparente de la supernova, extraite de sa courbe de lumière mesurée à Hawaï sur Megacam, et qui nous indique la distance à laquelle l'explosion s'est produite, autrement dit l'âge de l'explosion. Par l'étude d'un grand nombre de supernovae à diverses distances, il est alors possible de reconstruire l'histoire de l'expansion de l'univers.

IV — Supernovae et histoire de l'univers

Puisque aussi lumineuses que la galaxie qui les hébergent, les supernovae sont détectables jusque dans les galaxies les plus lointaines de notre univers. Or en raison de la vitesse finie de la propagation de la lumière, regarder loin dans l'espace c'est aussi regarder loin dans le temps. Les supernovae constituent donc un outil puissant pour retracer l'histoire de notre univers.

Selon le modèle standard du Big-Bang, maintes fois confirmé depuis une quarantaine d'années par les observations les plus variées, notre univers initialement extrêmement dense et chaud subit une expansion, tel un ballon que l'on gonfle. L'univers « naturel », conforme à

l'intuition et aux lois les plus élémentaires de la physique, verrait cette expansion ralentie au fil du temps en raison de l'attraction gravitationnelle des objets qui le constituent.

Où donc interviennent les supernovae dans cette histoire?

Plusieurs projets recherchent activement des supernovae de type I. Explosant selon des conditions extrêmement précises, qui imposent en particulier à l'astre défunt une masse rigoureusement égale à une fois et demi celle du soleil au moment de la catastrophe, ces supernovae ont une luminosité parfaitement déterminée et connue avec précision. Il suffit alors de mesurer la luminosité perçue pour en déterminer la distance, donc l'âge. Le taux d'expansion de l'univers relie alors directement cet âge avec le rapport entre les tailles de l'univers aujourd'hui et lors de l'explosion, donné par le décalage spectral de la supernova. L'étude des supernovae permet ainsi de valider le modèle du Big-Bang, de mesurer la vitesse d'expansion de l'univers ainsi que son ralentissement (prévu) ou accélération (improbable car difficilement compréhensible).

Avec les résultats des premières observations en 1998, toute cette théorie fut subitement mise à mal. Les supernovae paraissent plus loin que prévu ! Autrement dit, les photons provenant de l'explosion se sont propagés plus longtemps dans l'univers que prédit selon le schéma classique d'expansion, nécessitant ainsi un taux d'expansion plus lent par le passé et une phase récente d'accélération, bien à l'opposé du ralentissement escompté! Comment expliquer cette surprenante nouvelle ? Inutile de chercher du côté du contenu matériel de notre univers qui ne peut que freiner l'expansion. Mais alors, venons-nous de mettre en évidence une nouvelle forme totalement inconnue d'énergie, hâtivement baptisée sous le nom d'« énergie noire » à défaut de mieux ? C'est ce que l'expérience SNLS semble déjà confirmer, après 2 ans d'investigation poussée. Les progrès techniques les plus remarquables et les analyses les plus raffinées conduisent invariablement à cette même conclusion.

Faut-il remettre en question la théorie de la relativité générale ?

Non. Dans un tout autre but, Einstein avait déjà osé introduire dans ses équations décrivant l'univers une constante cosmologique aux propriétés analogues à celles de l'énergie noire récemment mise en évidence : présentant les apparences d'une gravité répulsive, elle permettait de contrecarrer l'attraction gravitationnelle de la matière et de maintenir un univers statique, conformément aux croyances des physiciens du début du XX^{ème} siècle. La découverte de l'expansion de l'univers par Edwin Hubble en 1929 vint néanmoins chambouler cette vision statique et Einstein, supprimant alors la constante ajoutée pour raisons subjectives, déclara qu'il avait commis « la plus grande bourde de sa vie ». Les études portant sur les supernovae remettent néanmoins d'actualité cette constante cosmologique, plus forte que jamais, de valeur plus importante que celle envisagée par Einstein.

Occupant 70% de la densité de notre univers, l'énergie noire n'est pas une bagatelle. Subissant cette expansion accélérée, les galaxies vont s'éloigner éternellement les unes des autres, à des vitesses de plus en plus prodigieuses. L'espace ne sera plus rempli que de vide, une triste galaxie totalement isolée venant parfois apporter localement une faible touche de lumière. D'après les résultats les plus récents, telle est la sombre et froide destinée de notre univers.

A moins qu'une nouvelle découverte, tout aussi inattendue que celle de l'énergie noire, ne vienne à nouveau chambouler tout cet édifice ? En quête de vérité, les observations menées par SNLS se poursuivent.