

AVEC NOS ÉLÈVES

La fontaine aux supernovæ

Noël Martin, Institut de Physique Nucléaire, Orsay
Thierry Foglizzo, Commissariat à l'Énergie Atomique, Saclay

Les explosions des supernovæ résultent d'un mécanisme complexe à étudier. La modélisation théorique de l'effondrement qui précède l'explosion des SN est très coûteuse en temps de calcul. La fontaine aux supernovæ recourt à une analogie hydraulique qui permet de rendre compte de certains aspects du phénomène. Cette analogie, utilisée par la recherche, débouche sur un excellent outil pédagogique.

L'espace regorge d'un grand nombre d'étoiles différentes, qui peuvent être plus légères ou des dizaines de fois plus massives que le Soleil. La masse joue un rôle primordial dans l'évolution de l'astre : les plus massives évoluent plus vite et peuvent avoir une durée de vie mille fois plus brève qu'une consœur plus légère. Les supernovæ correspondent à un phénomène d'explosion si lumineux qu'il peut être visible en plein jour. Ce phénomène survient à la fin de l'évolution des étoiles supergéantes. Ces étoiles très rares ne représentent que 0,6 % de la population stellaire.



Fig.1. La fontaine aux supernovæ lors de sa présentation au public au Palais de la découverte.

Une fin mouvementée

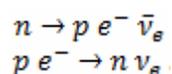
Les étoiles supergéantes se caractérisent par une masse de 10 à 70 fois la masse du Soleil, avec un rayon de 30 à 500 fois celui du Soleil. L'importante masse de ces étoiles leur permet d'atteindre la production du fer ^{56}Fe , considéré comme l'élément le plus stable car son noyau possède l'énergie de liaison par nucléon la plus forte. Pour

cette raison c'est le dernier noyau accessible par une réaction de fusion thermonucléaire. Toute réaction de fusion du ^{56}Fe avec un autre noyau – qu'il soit aussi élémentaire que l'hydrogène ou plus complexe – aurait pour produit un noyau moins lié.

Au terme de son évolution, l'étoile supergéante possède donc un noyau de fer en son centre. Les autres éléments sont répartis par couches superposées, de la moins dense à sa surface, à la plus dense dans le cœur. Le cycle de combustion s'amorce avec la fusion de l'hydrogène en hélium (^4He) dans un milieu où la température est d'environ 2.10^7 K (1,72 keV). Ce cycle passe par la production de carbone (^{12}C), de néon (^{20}Ne), d'oxygène (^{16}O), de silicium (^{28}Si), pour terminer à environ 3.10^9 K (259 keV) par la synthèse du fer (^{56}Fe).

L'effondrement s'amorce quand la masse du cœur de fer s'approche de la *masse de Chandrasekhar* (1,5 masse solaire). Elle correspond à la masse maximale que peut supporter la pression de dégénérescence des électrons avant que l'effondrement gravitationnel ne débute. Le cœur de fer est alors d'un diamètre d'environ 1500 km.

La fraction d'électrons dans le milieu est maintenue par l'équilibre entre deux réactions nucléaires, l'une dite désintégration β car elle s'accompagne de l'émission d'un électron, et l'autre appelée capture électronique ou β inverse :



Lorsque l'effondrement commence, l'équilibre bêta se déplace vers la production de neutrons (via la capture électronique). Cependant, il va provoquer une baisse importante du nombre d'électrons dans le milieu, et va faciliter l'effondrement. Le milieu s'enrichit donc en neutrons, jusqu'à ce qu'ils constituent environ 80% des nucléons.

L'effondrement qui a duré une fraction de seconde s'arrête brutalement lorsque les nucléons sont trop proches les uns des autres. Le cœur dur de l'interaction forte se définit par le moment où elle devient très répulsive.

À ces échelles de densité, parler de noyaux n'a plus de sens : seul subsiste un mélange de neutrons, protons et électrons (matière *npe*) qui forment une protoétoile à neutrons. Le mélange est si dense qu'il en devient opaque aux neutrinos.

Au regard de la faible durée de l'effondrement du cœur de fer on comprend que les couches supérieures (H, He, C, Ne, O, Si) n'en soient qu'à l'amorce de leur chute. Au terme de sa chute, la partie externe du cœur de fer rebondit sur la protoétoile à neutrons. De ce rebond une onde de choc va naître et se propager jusqu'à environ 150 km du centre. Une partie de l'énergie de l'effondrement est consommée pour dissocier le fer en nucléons lorsqu'il traverse l'onde de choc. Le mécanisme de mise en mouvement du choc pour conduire à une explosion soulève encore un grand nombre d'hypothèses. On suppose qu'il est principalement produit par l'absorption d'une fraction du flux de neutrinos par la couche de matière dense intérieure au choc stationnaire. Si le choc n'est pas mis en mouvement assez tôt, la masse qui s'accumule sur la protoétoile à neutrons atteint un seuil critique d'environ 2 masses solaires et celle-ci s'effondre en trou noir qui engloutit toute l'étoile. Si le choc est efficacement poussé par l'absorption des neutrinos, l'explosion des couches externes disperse dans le milieu interstellaire les éléments synthétisés par l'étoile au cours de sa vie.

Lors de l'effondrement une grande quantité de neutrinos sont produits par capture électronique. Les photons qui sont aussi produits ont plus de difficultés à s'extraire car ils interagissent beaucoup plus avec la matière que les neutrinos. Les neutrinos sont donc les premiers témoins de l'explosion d'une supernova. La supernova SN 1987A (23 février 1987) s'est manifestée par une augmentation rapide et soudaine du nombre de neutrinos détectés sur Terre, et ce *trois heures* avant l'arrivée des premiers photons.

L'expérience

La physique des supernovæ soulève un nombre important de questions qui n'ont pas toutes trouvé de réponse. Ainsi la mise en mouvement du choc est encore partiellement inexplicée. Ces difficultés sont dues à la complexité des phénomènes qui

entrent en jeu lors de l'effondrement du cœur. En effet sa description fait appel à la physique nucléaire, l'interaction des neutrinos avec la matière, l'hydrodynamique et la relativité générale. C'est dans ce cadre qu'est né le projet SuperNova to Neutron Stars (SN2NS) soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Il réunit une dizaine de chercheurs ayant pour objet d'étude les supernovæ et les étoiles à neutrons, abordées par des domaines différents de la physique.

La modélisation théorique de l'effondrement du cœur de l'étoile s'effectue par le biais de simulations numériques. Elles sont très coûteuses en temps de calcul et exploitent les supercalculateurs les plus puissants. Ces simulations numériques ont révélé la présence d'une instabilité hydrodynamique de l'onde de choc d'accrétion sur la protoétoile à neutrons. Cette instabilité appelée SASI (Stationary Accretion Shock Instability) vient rompre la symétrie sphérique lors de l'explosion. Les observations indiquent par ailleurs que l'explosion des supernovæ est effectivement asymétrique, à la fois du point de vue des inhomogénéités de composition des éjectas et par la mise en mouvement de l'étoile à neutron résiduelle. Dans l'étoile les asymétries induites par l'instabilité SASI peuvent accélérer la protoétoile à neutrons à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par secondes conforme aux observations, pendant que la quantité de mouvement opposée est emportée par la matière stellaire éjectée. Cette asymétrie peut aussi contribuer à faire tourner l'étoile à neutrons jusqu'à 10 tours par seconde, tout en communiquant aux éjectas un moment cinétique opposé.

L'expérience SWASI (Shallow Water Analogue of a Shock Instability, couche d'eau mince analogue d'une instabilité de choc) a mis en évidence ce phénomène d'instabilité grâce à l'analogie d'un écoulement d'eau publié dans la revue *Physical Review Letters* (Foglizzo et al. 2012).

Facile à mettre en œuvre dans le cadre d'une exposition publique, *la fontaine aux supernovæ* a été présentée pendant deux mois au *Palais de la découverte* à Paris dans le cadre de l'événement *Un chercheur une manip'* (décembre 2013-février 2014).

La fontaine se compose d'une zone annulaire d'injection d'eau en couche fine qui s'écoule jusqu'au centre de la fontaine le long d'un profil axisymétrique de forme hyperbolique en $1/r$, (figure 2). Comme on l'observe sur la vue en coupe, ce

profil produit une attraction radiale similaire à celle d'une protoétoile à neutron qui serait au centre. Au centre de la fontaine, l'eau s'écoule par le bord supérieur d'un cylindre dont le rayon délimite la surface de la protoétoile à neutrons.

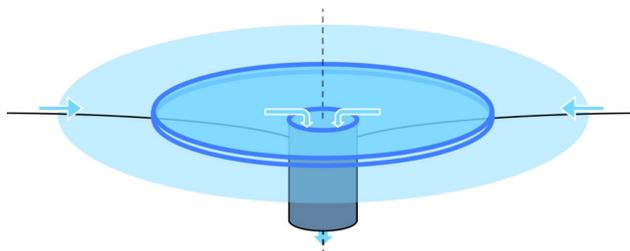


Fig.2. Vue de la cuve de la fontaine en perspective cavalière.

Lorsque l'eau circule dans la fontaine (figure 3), deux zones d'écoulement apparaissent. Elles sont délimitées par un ressaut hydraulique qui correspond au choc d'accrétion stationnaire dans l'étoile. Du bord de la fontaine au ressaut, on observe la zone où le liquide se propage plus rapidement que les vagues. Cette zone correspond à la région « supersonique » dans l'étoile, là où le gaz tombe en chute libre. Dans la zone plus profonde située après le ressaut, l'eau se propage moins vite que les vagues. Cette zone correspond à la région dite « subsonique » au sein de l'étoile, où se développe l'instabilité SASI.

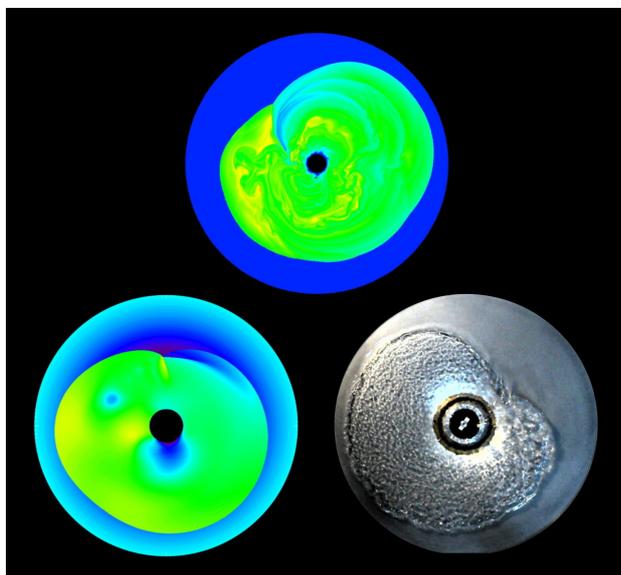


Fig.3. De haut en bas, et de gauche à droite, on observe successivement : (i) la simulation numérique montrant l'instabilité SASI, (ii) les résultats de simulation hydrodynamique SWASI, (iii) une photo du dispositif expérimental (La fontaine aux supernovae) lors de son fonctionnement. Le centre de chacune des figures correspond à la proto-étoile à neutron accrétant la matière.

La fontaine aux supernovæ exploite le parallèle entre les ondes sonores au sein d'un gaz (SASI) et les vagues à la surface de l'eau (SWASI). Le ressaut est initialement circulaire et stationnaire puis commence à osciller avec une période de 3 secondes. C'est à cet instant que le choc perd sa symétrie. Son oscillation se transforme ensuite en mouvement de rotation.

Nous avons disposé au centre de la fontaine un tourniquet mobile qui peut tourner librement et suivre les mouvements de l'eau. Par sa rotation dans le sens inverse du ressaut, ce tourniquet illustre la conservation du moment cinétique.

L'instabilité créée engendre la déformation du ressaut initial jusqu'à ce qu'il atteigne le bord de la fontaine dans une direction aléatoire, en quelques dizaines de secondes. Dans le cas de l'étoile, la taille du choc est un million de fois plus grande et les échelles de temps sont 100 fois plus courtes que dans la fontaine.

Comme il n'y a pas d'équivalent des neutrinos dans l'expérience SWASI, l'analogie astrophysique s'arrête avant la mise en mouvement accélérée du choc vers l'extérieur. Les travaux théoriques indiquent que les mouvements instables de SWASI sont produits par l'interaction entre les tourbillons et les vagues par le même mécanisme qui couple les tourbillons aux ondes sonores dans l'instabilité SASI au cœur de l'étoile.

Conclusion

La fontaine est devenue un excellent outil pédagogique pour permettre au plus grand nombre de visualiser des phénomènes souvent considérés comme complexes et abstraits. Ces phénomènes se produisent loin de nous, à des échelles sans communes mesures avec notre quotidien et font appel à des processus physiques complexes. En plus du côté pédagogique, elle offre aux étudiants en sciences un exemple concret de ce que la recherche académique peut produire.

À l'issue de l'événement *Un chercheur une manip'*, la fontaine a été choisie par le *Palais de la découverte* à Paris, pour intégrer sa collection permanente. Le dispositif s'est vu récompensé par le prix « Le goût des Sciences » 2014 attribué par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.