

cent restants continuent de s'effondrer et forment un noyau dense de particules : une étoile à neutrons. Cette étoile possède une surface solide. Sa masse est à peu près équivalente à celle du Soleil, mais elle est comprimée à l'intérieur d'une sphère de dix kilomètres de rayon, de sorte que l'intensité de la force gravitationnelle à sa surface est cent milliards de fois celle de la surface terrestre.

À sa naissance, l'étoile à neutrons est un objet extrêmement chaud, mais sa température baisse en quelques années jusqu'à environ dix millions de degrés. Sa rotation est très rapide, jusqu'à 500 tours par seconde, et son champ magnétique est intense, car le champ magnétique stellaire initial est densifié lors de l'effondrement de la supernova. En partant d'une étoile dont le champ magnétique est initialement de un ou deux gauss (10^{-4} tesla), du même ordre de grandeur que celui de la Terre ou du Soleil, l'effondrement comprime ce champ jusqu'à 10^{12} gauss (10^8 teslas).

Notre Galaxie contient environ un milliard d'étoiles à neutrons, résidus des explosions de supernovae. Toutefois, comme les étoiles à neutrons rayonnent peu d'énergie décelable, seules quelques-unes sont détectées directement. Les étoiles à neutrons émettent essentiellement des ondes radio focalisées. Comme un phare qui éclaire à intervalles fixes un navire, certaines étoiles à neutrons éclairent la Terre de leur rayonnement radio régulier. Les astronomes connaissent environ un millier de telles étoiles, que l'on nomme pulsars. Plusieurs centaines d'entre elles sont aussi des sources de rayonnement X, qu'on ne détecte pas du sol, en raison de l'absorption atmosphérique, mais que des satellites enregistrent.

De nombreuses étoiles à neutrons sont dans des systèmes binaires, où

leur compagnon est une étoile ordinaire. La force gravitationnelle colossale de l'étoile à neutrons attire lentement le gaz de son compagnon et l'accélère à grande vitesse (une fraction notable de la vitesse de la lumière). Ce gaz s'écrase alors à la surface de l'étoile, libérant son énergie cinétique sous forme de rayonnement X. Dans de nombreux cas, cependant, on observe seulement un vestige ténu de supernova, c'est-à-dire les restes des couches externes de l'étoile qui a explosé, projetés dans l'espace à des vitesses supersoniques. Quand cette enveloppe de gaz rencontre des atomes du milieu interstellaire, elle est excitée et émet une faible lueur X qui peut persister 10 000 ans, voire davantage.

Ainsi, comme le sursaut du 5 mars 1979 semblait provenir du vestige de la supernova N 49, il était plausible que la source en soit une étoile à neutrons. La période de pulsation de huit secondes du sursaut sur le déclin restait cependant une énigme : en général, dès leur formation, les étoiles à neutrons sont en rotation très rapide, en raison de la conservation du moment cinétique de l'étoile mère. De la même façon qu'une patineuse accroît sa vitesse de rotation en rapprochant les bras de son corps, l'étoile à neutrons, très petite, tourne beaucoup plus vite que son étoile mère. Certes, à mesure que l'étoile à neutrons perd de l'énergie par émission de rayonnement radio, elle ralentit, mais trop lentement pour expliquer la vitesse de rotation observée : avec l'intensité des champs magnétiques estimés pour les étoiles à neutrons ordinaires, il faudrait cent millions d'années pour que la période de rotation initiale ralentisse à huit secondes, et l'âge de N49 n'est que de 5 000 ans.

Nouvelles sources, nouveaux déboires

Toujours en 1979, Evgueny Mazets et ses collègues de l'Institut Ioffe, à Saint-Petersbourg, annoncent la découverte d'une autre source de sursauts à répétition, qu'ils nomment 1900+14, d'après ses coordonnées célestes. La source est plus discrète : elle n'émet que trois courts sursauts de rayonnement gamma avant de se taire. Cette source se situe dans le plan de notre Galaxie, mais sa position exacte reste mal définie. De surcroît, la grande quantité de poussières et de gaz du plan galactique absorbe la lumière visible et rend impossible l'identification de cette source dans le visible.

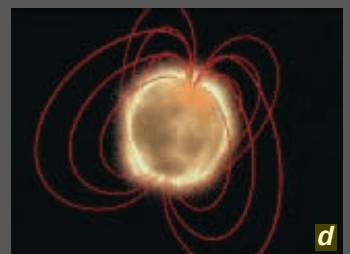
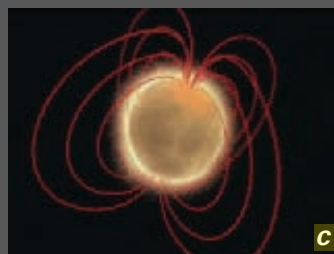
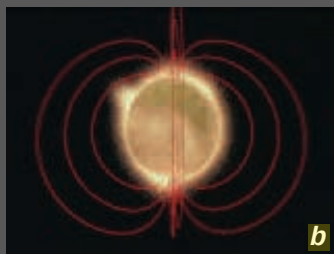
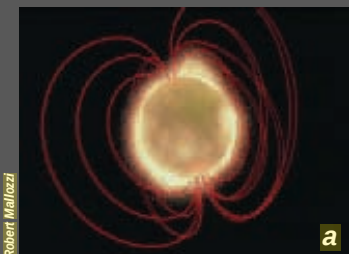
Après ces observations, les astronomes avaient encore du mal à préciser en quoi ces sources à répétition diffèrent des sources non répétitives de sursauts. S'agit-il de deux manifestations d'une même catégorie d'objets ?

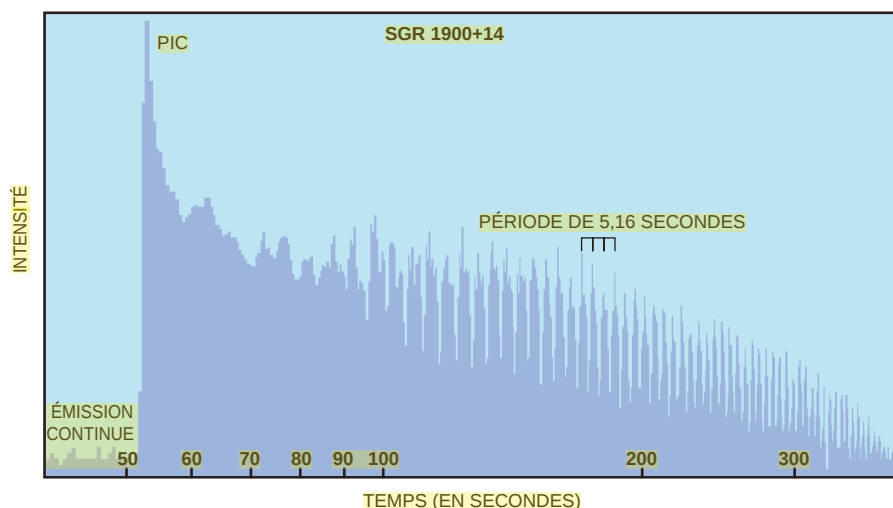
Sept ans sont nécessaires à la découverte d'une autre source à répétition : en 1986, Jean-Luc Atteia, du Centre d'études spatiales des rayonnements de Toulouse (CESR), et moi-même découvrons une nouvelle source, que nous nommons SGR 1806-20. Le sigle SGR signifie ici *Soft Gamma Repeater*, soit «source à répétition de rayonnement gamma mou».

Cette source, située dans une direction proche de celle du centre galactique, émet des rayonnements gamma de moindre énergie qu'une source ordinaire de sursauts gamma (d'où l'adjectif mou). Cette fois, les sursauts arrivent à une fréquence étonnante : en quelques mois, une centaine de sursauts sont enregistrés. Au moment de son maximum d'activité, la source émet jusqu'à dix sursauts par jour. Bien que

2. LE SPECTACLE D'UNE MAGNÉTOILE est figuré sur cette simulation. Situé à quelques centaines de kilomètres de l'étoile à neutrons, un observateur verrait une sphère en rotation avec des zones plus ou moins brillantes selon la température de la croûte de l'étoile (a, b, c) ; l'axe de rotation est vertical et on a représenté en rouge les lignes de champ magnétique, normalement invisibles. La période de rotation est de quelques secondes. Dans la suite, on fige la rotation (d). En raison de contraintes qui s'exercent sur la croûte, celle-ci craque. Après ce tremblement

d'étoile, la croûte est chauffée et fond par endroits, d'où l'apparition de nouvelles zones brillantes (e, f, g). Les électrons émis par les zones chaudes de la croûte se déplacent le long des lignes de champ magnétique et ils rayonnent une lueur orangée (h). De plus en plus d'électrons sont émis (i, j, k, l, m). La croûte se réarrange et les lignes de champ, attachées à la croûte, se déplacent (n, o, p). Ces oscillations des lignes de champ accélèrent les électrons qui perdent leur énergie en émettant un intense rayonnement gamma.





3. L'ÉMISSION GAMMA DU SURSAUT DU 27 AOÛT 1998, le plus intense sursaut jamais observé, a été enregistrée par la sonde *Ulysse*. Après un pic d'intensité qui a duré quelques secondes, l'émission a décliné avec de brefs sursauts qui revenaient toutes les 5,16 secondes.

relativement intenses, aucun de ces sursauts n'atteint l'ampleur de l'événement observé en 1979, et la source cesse ses émissions en novembre 1986. Tout comme 1900+14, la source se trouve dans une direction du plan galactique très obscurcie par les poussières, et n'a pas d'homologue visible évident.

Avec trois sources gamma à répétition connues, les astronomes soupçonnaient l'existence d'une nouvelle classe d'objets. Quelles étaient leurs caractéristiques communes ? D'abord, elles étaient répétitives. Ensuite, leur spectre (la quantité d'énergie en fonction de la fréquence) différait de ceux des sursauts gamma : le rayonnement des sursauts gamma à répétition est d'énergie moindre que celui des sursauts classiques. Enfin, les sursauts étaient généralement très courts, de l'ordre de 100 millisecondes.

Ces ressemblances n'étaient toutefois pas suffisantes pour unifier cette classe d'objets. Par exemple, le spectre de l'émission particulièrement intense du 5 mars 1979 se rapprochait de celui des sursauts gamma classiques, avec une grande proportion de rayons gamma de haute énergie. Les sursauts n'étaient pas tous courts, certains durèrent plusieurs secondes. Enfin, la cadence des répétitions était très variée,

et apparemment chaotique : certaines sources sont restées actives quelques jours, d'autres ont duré plusieurs mois.

Pour expliquer ces phénomènes, les théoriciens ont avancé une multitude de théories, dont certaines étaient carrément farfelues, invoquant par exemple des monopôles magnétiques ou des étoiles composées de matière sous forme de quarks. Aucune de ces théories n'a pu être vérifiée par l'observation : avec trois sources seulement, les données étaient insuffisantes.

Vers l'unification

En 1990 et 1991, on lança deux sondes spatiales équipées de nouveaux détecteurs destinés à étudier les sursauts gamma et les sources gamma à répétition. La première au départ, la mission *Ulysse*, mise au point par l'Agence spatiale européenne, avait pour objectif l'étude de l'héliosphère. Pour mener à bien cette mission, elle devait sortir du plan de l'écliptique, le plan de rotation de la Terre et des planètes, ce qui est coûteux en énergie. Aussi, avec mes collègues du CESR et de l'Institut Max-Planck de Garching, nous avons construit un instrument très léger, nommé GBR (pour *Gamma-Ray Burst*, ou «sursaut de rayonnement gamma»).

L'instrument ne pesait que deux kilogrammes avec une surface sensible de 20 centimètres carrés.

À l'opposé, l'Observatoire *Compton* (GRO), mis au point par la NASA, était la plus lourde sonde spatiale scientifique jamais mise en orbite. Elle emportait notamment huit détecteurs qui traquaient les sources gamma transitoires (BATSE), dont chacun avait une surface de collecte cent fois plus grande que celle d'*Ulysse* (pour des raisons d'orientation, chaque sursaut était reçu sur un ou deux de ces détecteurs).

Malgré leurs différences de conception, les deux instruments étaient complémentaires. La spécialité de BATSE était la détection des sursauts très faibles, mais avec une incertitude de plusieurs degrés sur la localisation. En raison de sa petite taille, le détecteur d'*Ulysse* était peu sensible et n'enregistrait que les sursauts les plus intenses. Toutefois, comme *Ulysse* était loin de la Terre, lorsque les deux engins détectaient un même sursaut, la comparaison des temps d'arrivée du signal sur les deux détecteurs autorisait la localisation de la source avec une excellente précision, parfois inférieure à la minute d'angle. Cette complémentarité fut cruciale dans l'étude des sources gamma à répétition. Ainsi, en 1992, lorsque SGR 1900-14 s'est brièvement manifesté par quatre sursauts, après de longs mois de silence, nous avons déterminé sa position avec une bien meilleure précision (voir la figure 4).

L'observation multi-longueurs d'onde

En 1993, Shrinivas Kulkarni et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont déterminé qu'un bon moyen de trouver la nature des sources gamma à répétition serait de les rechercher aux longueurs d'onde radio. Contrairement à la lumière visible, les ondes radio traversent sans trop d'absorption les zones de poussières de notre Galaxie. De surcroît, les électrons de haute énergie, présents dans les restes de supernovae, émettent dans

