

Sursauts X des étoiles à neutrons

Une façon de contraindre l'équation d'état de la matière dense

Romain Artigue (artigue.romain@gmail.com) et Jérôme Margueron⁽²⁾ (j.margueron@ipnl.in2p3.fr)

(1) Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), UMR 5277 CNRS, Université Toulouse Paul Sabatier, 9 avenue du Colonel Roche, BP 44346, 31028 Toulouse

(2) Institut de Physique Nudéaire de Lyon (IPNL), UMR 5822 CNRS, Université Claude Bernard, 4 rue Enrico Fermi, 69622 Villeurbanne Cedex

La matière la plus dense observable dans l'Univers se trouve au cœur des étoiles à neutrons. Il arrive que ce type d'astre forme un couple avec une étoile compagnon, ce système binaire se caractérisant par un transfert de masse, par accréation, de l'étoile compagnon vers l'étoile à neutrons. L'explosion thermonucléaire de matière accrétée à la surface de l'objet donne lieu à une émission du flux en rayons X, décuplée et modulée à sa fréquence de rotation.

En sondant la courbure de l'espace-temps à la surface de l'étoile à neutrons, les pulsations ainsi observées se révèlent être un moyen direct d'investigation des propriétés de l'étoile, comme sa masse et son rayon.

L'étoile à neutrons : un laboratoire de la physique extrême

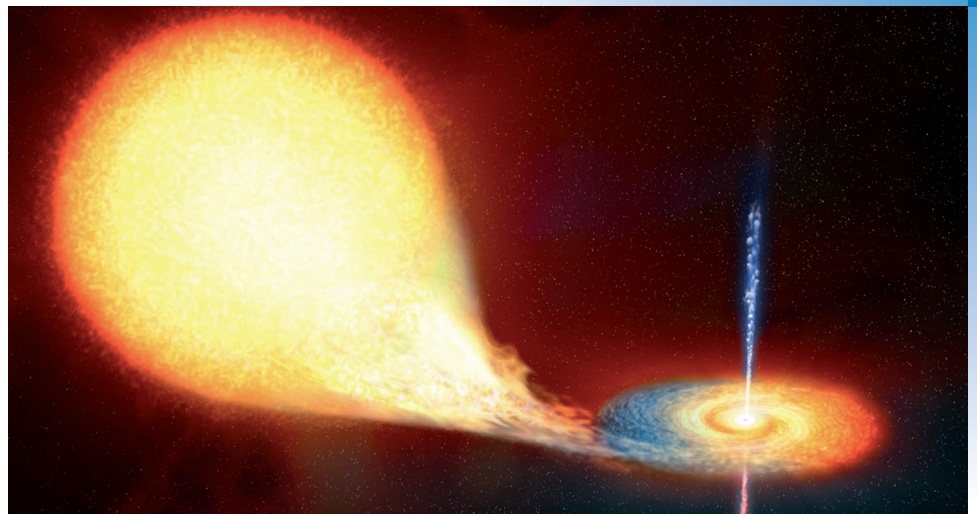
Au cours de sa « vie », une étoile sur sa séquence principale compense son auto-effondrement naturel grâce à une pression générée par la radiation centrifuge produite par les réactions de fusion d'éléments légers. Mais en arrivant à l'épuisement de son combustible, l'étoile se contracte et une nouvelle pression apparaît : celle induite par le principe de Pauli, qui empêche deux électrons identiques d'occuper le même état. Les naines blanches résultent de ce nouvel équilibre. Après la découverte nobélisée du neutron comme particule élémentaire par James Chadwick en 1932, Walter Baade et Fritz Zwicky avancèrent l'idée selon laquelle les *supernovae* d'effondrement gravitationnel représentent la transition d'une étoile massive ordinaire (de 8 à 30 masses solaires environ) vers une étoile à neutrons, un astre extrêmement compact qui posséderait un rayon d'une dizaine de kilomètres et une masse d'environ 1,4 masses solaires. Des astres aussi compacts sont restés longtemps inobservés, et le seraient encore s'ils n'étaient pas le site de processus très particuliers, comme par exemple le système binaire représenté sur la figure 1 et que nous détaillerons par la suite.

Une étoile à neutrons constitue un état d'équilibre stable entre la gravitation et l'interaction forte entre les nucléons (neutrons et protons), qui est très répulsive à haute densité. De sa surface jusqu'à son cœur, la matière s'organise sous différentes

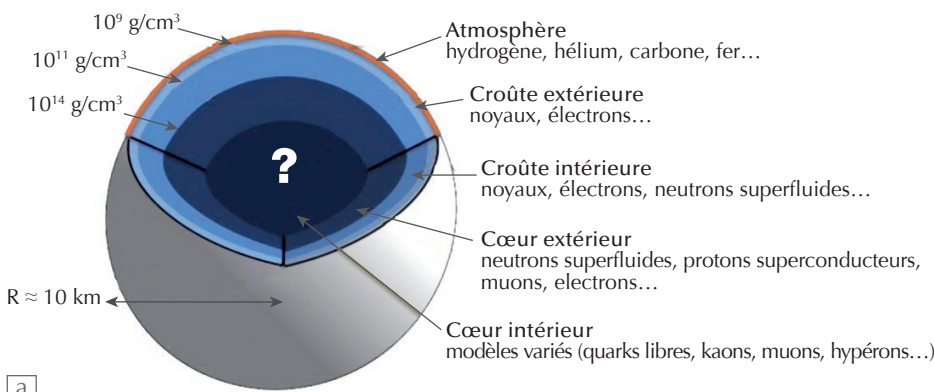
formes. L'étoile à neutrons présente une écorce d'environ un km d'épaisseur (croûtes extérieure et intérieure sur la figure 2a) et, dans sa région interne, un cœur liquide. La nature et les propriétés de la matière à la surface d'une étoile à neutrons sont raisonnablement bien comprises. Pour les couches les plus profondes, nous atteignons les limites de nos capacités prédictives basées sur nos connaissances actuelles ; plusieurs scénarios sont envisageables, dont celui d'un état de quarks déconfinés, aussi appelé le plasma de quarks et de gluons, qui est étudié grâce aux grands accélérateurs de particules tels que le Large Hadron Collider du CERN. Ces expériences en laboratoire sondent la région de haute température et basse densité du diagramme de phase. Les étoiles à neutrons sont par contre un laboratoire pour explorer la région du diagramme de phase à haute densité, qui est encore inaccessible aux expériences sur Terre.

Équations d'état de la matière dense

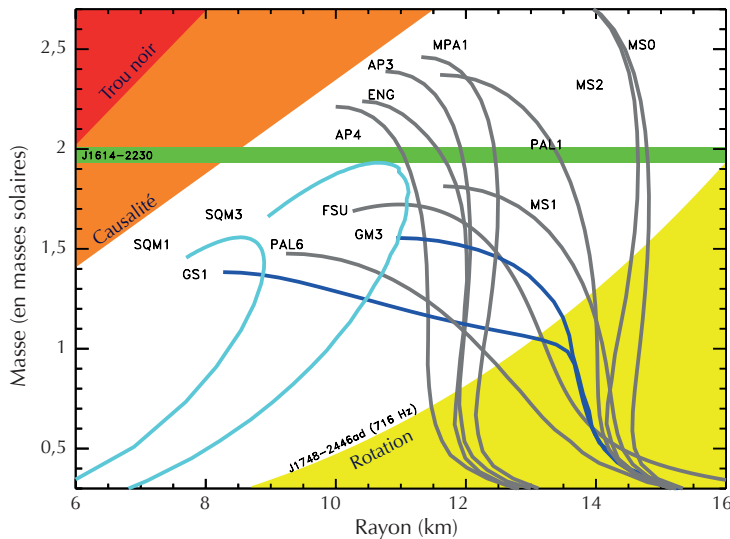
Le cadre théorique permettant de déterminer la structure des étoiles à neutrons fut établi par Oppenheimer et Volkoff (1939). Il s'agit de résoudre les équations d'Einstein de la relativité générale pour un fluide parfait autogravitant statique et à symétrie sphérique, c'est-à-dire une géométrie de l'espace-temps donnée par la métrique de Schwarzschild. On obtient de cette manière le système d'équations de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) qui, complété par la donnée de l'équation



1. Représentation d'un système binaire accrétant, constitué d'une étoile à neutrons (à droite) et d'une étoile compagne de type solaire (à gauche). Le transfert de masse donne lieu à la formation d'un disque d'accrétion autour de l'étoile à neutrons, caractérisant la chute libre de la matière en spirale. (Vue d'artiste, source : ISDC)



a



b

2. Intérieur d'une étoile à neutrons et équations d'état de la matière dense.

(a) Coupe d'une étoile à neutrons, contenant différentes couches, de la surface vers le cœur ; ce dernier est susceptible de contenir des formes exotiques de la matière.

(b) Diagramme masse-rayon des étoiles à neutrons, présentant des courbes associées à différentes équations d'état de la matière dense (cyan : modèles « étranges », à plasma de quarks ; bleu foncé : modèles exotiques à kaons, hypérons... ; gris : modèles traditionnels, à nucléons). La zone orange est exclue par le principe de causalité (de telles valeurs de masse et de rayon impliqueraient une vitesse du son supérieure à celle de la lumière). La zone rouge définit la limite de création d'un trou noir. La zone jaune est exclue, car les configurations correspondantes entraîneraient la dislocation de l'objet sous les effets de la force centrifuge (J1748 est le pulsar qui tourne le plus rapidement détecté à ce jour). La bande verte correspond à la masse maximale observée d'une étoile à neutrons (Demorest *et al.*, *Nature*, **467** (2010) 1081), par effet Shapiro dans la bande radio. Les équations d'état qui ne permettent pas d'atteindre cette masse maximale sont donc invalidées par cette observation récente.

d'état de la matière dense, décrit l'équilibre hydrostatique relativiste, l'espace-temps interne à l'étoile et la structuration de la matière. Pour une équation d'état donnée, on trouve un ensemble de solutions stables [1], qui peuvent être caractérisées par une courbe quasiment unique dans le diagramme masse-rayon. La figure 2b montre un ensemble de courbes dont chacune est associée à une unique équation d'état. La relation entre la masse et le rayon est caractéristique de l'équation d'état (voir la légende de la figure pour plus de détails).

La mesure directe d'un rayon d'une dizaine de kilomètres pour des objets distants de plusieurs kiloparsecs est impossible aux résolutions actuelles des télescopes, et le restera certainement encore très longtemps. On peut cependant ruser et plusieurs méthodes ont été proposées :

- l'étude des raies spectroscopiques du fer présent à la surface pour mesurer le *redshift* gravitationnel de l'étoile ;
- l'étude des délais temporels induits par la déformation de l'espace-temps à proximité de l'étoile (effet Shapiro : la lumière passant près de l'étoile arrive avec un délai par rapport à la lumière nous parvenant directement) dans la bande d'émission radio des pulsars ;
- l'ajustement des pulsations détectées durant l'émission persistante des binaires X ou lors des sursauts X (sujet du paragraphe suivant).

D'autres contraintes, théoriques, permettent d'exclure des régions de ce diagramme (voir légende de la figure 2).





Systèmes binaires X

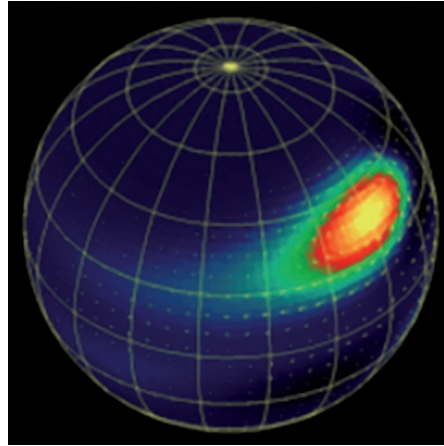
L'étoile à neutrons n'est plus une « étoile » au sens propre du terme, étant donné qu'elle ne constitue plus une source d'énergie et se refroidit irrémédiablement... sauf si elle se trouve dans un système binaire et produit des sursauts X. En effet, avec une fréquence de rotation qui peut atteindre plusieurs centaines de hertz (1 hertz = 1 rotation par seconde), et une masse supérieure à celle du Soleil, le champ gravitationnel de l'étoile à neutrons déforme l'espace-temps dans son environnement proche, si bien que toute matière passant dans son voisinage subit les effets de la relativité générale en champ fort. C'est le cas de la matière accrétée des systèmes binaires.

Les binaires X sont des systèmes stellaires doubles constitués d'une étoile à neutrons (ou d'un trou noir) et d'un compagnon stellaire en interaction (fig. 1), dont la caractéristique principale est qu'un transfert de masse du compagnon vers l'objet compact est à l'origine d'un important rayonnement X. Ils sont essentiellement observés dans le bulbe de la Voie Lactée ou au sein des amas globulaires, et restent dynamiquement stables durant plusieurs milliards d'années.

Si le compagnon possède une masse proche de celle du Soleil, le transfert de masse s'effectue à travers le point d'équilibre entre les forces de gravitation des deux systèmes (point de Lagrange L1), aussi appelé lobe de Roche. Le gaz « aspiré » possède un moment cinétique trop grand pour tomber directement sur l'étoile à neutrons ; il se met donc en orbite autour de celle-ci pour former un disque d'accrétion. Les différences de vitesse au sein du disque créent des forces de frottement visqueux qui permettent au gaz de dériver doucement en spirale vers la surface de l'objet. Localement, la température produite par cette friction du gaz peut atteindre des millions de degrés dans les régions centrales du disque pour permettre l'émission en rayons X observée [2]. Cette émission X est continue, contrairement aux sursauts que nous allons détailler maintenant.

Sursauts X

Sporadiquement, la matière accrétée peut atteindre l'étoile à neutrons. Les réactions de fusion nucléaire faisant intervenir la matière (hydrogène et hélium) s'accumulant sur la surface de l'étoile ont



3. Modélisation d'une tache chaude issue de l'explosion thermonucléaire de matière accrétée. (Source : Spitkovsky et al., *ApJ*, 566 (2002) 1018).

lieu continuellement. Localement, lorsqu'une certaine hauteur de colonne de matière est amassée, la chaleur relâchée par une réaction provoque une augmentation de la température (jusqu'à 10^{8-9} K) et ainsi une augmentation du taux de réactions, qui n'est pas compensée par le refroidissement. Un emballement thermonucléaire s'enclenche, la combustion devient instable ou explosive : on dit que c'est un sursaut X (fig. 3). Cet événement provoque une croissance brutale du flux de rayons X durant quelques secondes ou minutes, avant une décroissance caractérisant le refroidissement de la surface (fig. 4a). L'accrétion se poursuit après le sursaut et, au bout d'un certain temps, la surface aura accumulé une colonne de matière suffisante pour générer un nouveau sursaut.

Les sursauts X se manifestent sous différents aspects selon la nature des réactions nucléaires. Ceux de *type 1* concernent les allumages par combustion instable d'hydrogène seul, d'hélium seul et parfois d'un mélange des deux. Le délai entre deux sursauts X est de quelques heures. En revanche, lorsqu'une colonne de carbone accumulée est suffisante (après plusieurs sursauts de type I), sa combustion instable mène à un *supersaut* qui peut durer plusieurs heures. Ces phénomènes sont bien plus rares, leur temps de récurrence étant de plusieurs années. Enfin, les sursauts de *type 2 (dits rapides)* peuvent être séparés de quelques minutes et sont moins énergétiques. Observés de façon assez marginale, ils sont probablement dus à des instabilités brutales du disque d'accrétion, provoquées par des effets de viscosité ou de champ magnétique.

Historique de la découverte

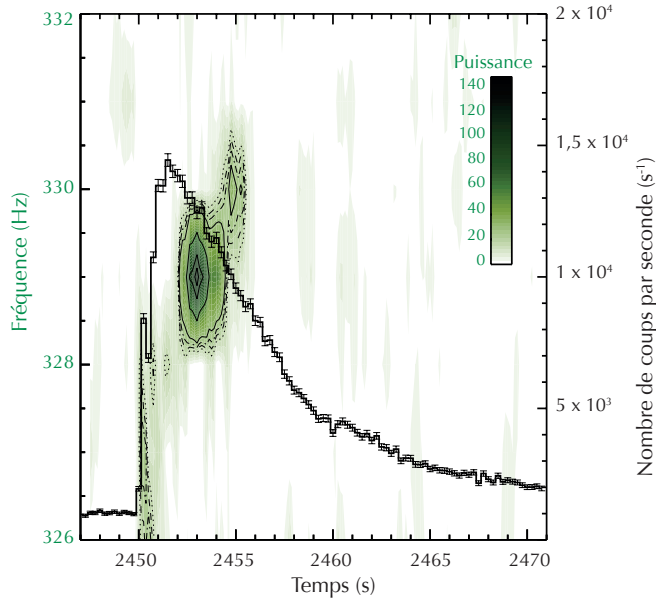
L'observation de l'Univers en rayonnement X s'est développée très récemment. Les rayons X étant fortement absorbés par l'atmosphère terrestre, il faut en sortir pour faire des observations. En 1962, une source lumineuse, Sco X-1, fut découverte grâce aux compteurs Geiger installés dans le nez de la fusée *Aerobee 150* de l'United States Air Force. Ainsi débuta l'astronomie X.

En 1967, dans la quasi-indifférence de la communauté, Shklovsky émit l'hypothèse que la source Sco X-1 était en fait une étoile à neutrons accrétant la matière d'une étoile compagnon. À cette époque, aucune étoile à neutrons n'avait encore été détectée. En 1967, la perspicacité d'une étudiante irlandaise, Jocelyn Bell, utilisant le radiotélescope de Cambridge, conduisit à l'observation d'une première source persistante, extérieure au système solaire et périodique à 1,337 secondes. Elle fut rapidement associée à une étoile à neutrons en rotation. Peu après, d'autres observations permirent de valider le scénario du disque d'accrétion.

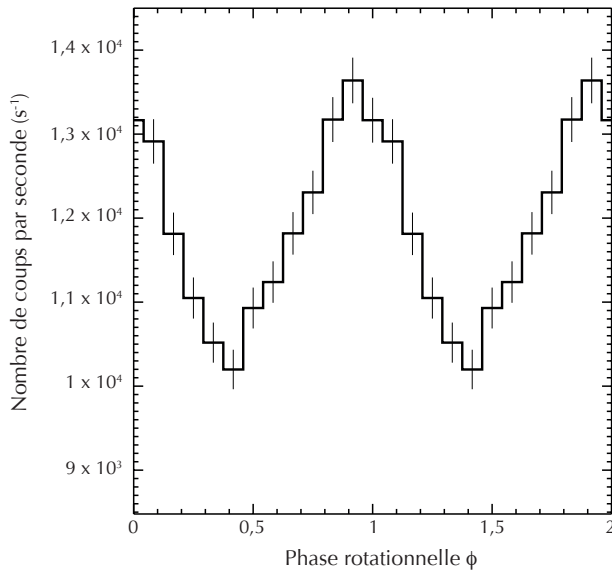
En juillet 1969, le satellite *Vela 5b* observa une poussée brutale (quelques secondes) du flux de rayons X de la source Cen X-4. Mais cette émission ne fut pas associée à un sursaut X. Il fallut attendre l'observation par l'*Astronomical Netherlands Satellite* de deux sursauts de la source 3U 1820-30, relevés par Grindlay (1976), pour que paraisse le premier article concernant cette découverte. Il y eut dès lors un intérêt croissant pour la recherche de signaux pulsés générés par les sursauts X [3].

Depuis 1969, plus d'une quinzaine d'instruments ont participé à l'observation de plus de 11 000 sursauts X, émis par une centaine de sources différentes. Lancée le 30 décembre 1995, la mission *Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)* de la NASA est à l'origine de la plupart des découvertes. Ses opérations se sont achevées le 3 janvier 2012. Ce satellite de 3 tonnes fut placé sur une orbite basse de 600 km. Il embarqua trois instruments pour la détection des rayons X, dont le détecteur principal, le *Proportional Counter Array (PCA)*, couvrait la bande d'énergie 2-60 keV avec une très grande surface collectrice (6500 cm²) et une résolution temporelle inférieure à 1 microseconde, idéale donc pour étudier les phénomènes de grande variabilité.

a



b



4. Détection d'oscillations périodiques lors d'un sursaut X.

(a) Variation du flux de rayons X en fonction du temps, lors du sursaut X de la source 4U 1702-429, observé le 26 juillet 1997 par la mission RXTE de la NASA. La croissance du flux dure environ 1,5 s, la décroissance dure plus de 15 s. Pendant le sursaut, le flux est décuplé. La couleur vert foncé est associée à la forte détection d'un signal périodique, oscillant à une fréquence proche de 329 Hz sur un segment de 2 secondes dans la queue du sursaut.
 (b) Profil moyen des oscillations périodiques détectées durant ce sursaut X pendant deux cycles.

Oscillations périodiques

Les oscillations périodiques du flux pendant les sursauts X ne sont pas systématiquement détectées. Elles ne sont confirmées que pour moins de 20 systèmes observés. Elles apparaissent durant la phase de croissance ou de décroissance du sursaut, ou s'étalent sur les deux. Elles montrent une grande cohérence et des amplitudes relatives atteignant environ 20% du flux total de l'émission. Les spectres de puissance dynamiques

permettent de montrer l'évolution de la fréquence au cours du sursaut (fig. 4a). Des dérives en fréquence de quelques hertz sont observées jusqu'à atteindre une valeur asymptotique stable, supposée être la fréquence de rotation de l'étoile.

L'explosion thermonucléaire provoque donc l'apparition d'une région plus chaude que le reste de l'étoile. Sans connaître parfaitement sa géométrie ni sa localisation, on sait qu'elle crée une asymétrie azimutale de brillance, comme l'illustre la figure 3.

Les oscillations de sursauts observées sont donc interprétées comme le résultat de la rotation d'une tache brillante à la surface de l'étoile [4]. De plus, les photons émis se propagent dans l'espace-temps relativiste déformé par l'objet compact et par la traversée d'une atmosphère diffusante. Cela affecte notablement leur trajectoire et leur énergie et laisse des signatures encodées dans la forme des oscillations, comme nous allons le voir plus loin.

En général, seuls une vingtaine de photons sont observés par cycle. Pour avoir un profil statistiquement significatif, il faut donc procéder à un empilement de phases des données à la fréquence du signal durant les segments de détection des oscillations ; il est possible de construire des profils moyens d'oscillations, c'est-à-dire des pulsations qui caractérisent le flux moyen émis lors du sursaut durant un cycle rotationnel (fig. 4b). Les profils moyens d'oscillations des sursauts X présentent une grande variabilité d'un sursaut à un autre et d'une source à une autre, en terme d'amplitude relative notamment. Cette variabilité s'explique par les différentes masses et rayons des étoiles et leur angle d'observation, mais aussi par la position, la température et la taille de la tache.

Contraindre la masse et le rayon de l'étoile

Une mesure précise à la fois de la masse et du rayon de l'étoile à neutrons permettrait de discriminer efficacement les modèles d'équation d'état de la matière dense (fig. 2b). Les trajectoires des photons émis par la surface de l'étoile et parvenant jusqu'à l'observateur empruntent les géodésiques de l'espace-temps courbé dans le voisinage de l'étoile à neutrons. Cette courbure, à travers notamment l'effet de retard du rayonnement (effet Shapiro), est d'autant plus grande que la compacité de l'étoile est importante, celle-ci correspondant au rapport de la masse sur le rayon de l'étoile. Parvenir à quantifier cette compacité en ajustant les profils d'oscillations périodiques permet donc, en théorie, une mesure des deux paramètres que sont le rayon et la masse de l'étoile (voir encadré, p. 18). L'exploitation des sursauts X devrait donc permettre de déterminer le rayon et la masse des étoiles à neutrons, et donc de mieux contraindre l'équation d'état de la matière dense (fig. 2b).





Applications et perspectives

Les procédures d'ajustement des profils aux données sont très consommatrices en temps de calcul et exigent des moyens de simulation importants. Jusqu'alors, les résultats ont montré que les contraintes sur la masse et le rayon de l'étoile sont limitées par la qualité des données du détecteur PCA. En effet, les incertitudes de mesure sont trop grandes pour dessiner des contours fermés dans le diagramme masse-rayon, et apporter des contraintes fortes aux modèles d'équation d'état.

En décembre 2016, l'instrument spatial NICER (Neutron star Interior Composition ExploreR) de la NASA sera joint à la station spatiale internationale. C'est un instrument dédié à l'observation en X des étoiles à neutrons et l'on espère pouvoir collecter des données de bien meilleure qualité que celles dont nous disposons actuellement. De plus, l'agence spatiale européenne (ESA) a récemment donné son aval pour développer la mission ATHENA+, qui est, entre autres, dédiée à l'observation en rayons X des phénomènes liés aux systèmes binaires. Sa très grande résolution en énergie sera un atout pour l'ajustement des pulsations périodiques, et la qualité statistique des données provenant des sursauts X sera optimisée en utilisant de très grandes surfaces collectrices de photons, comme le proposent les missions spatiales qui sont régulièrement candidates à la sélection auprès de l'ESA ou de la NASA. Les simulations actuelles montrent de façon réaliste que la qualité statistique de telles données permettra de mesurer à quelques pourcents près la masse et le rayon d'un ensemble d'étoiles à neutrons [5], et d'avancer donc grandement dans la compréhension du comportement de la matière dans des milieux de densité extrême. ■

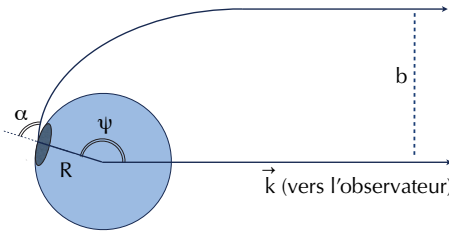
Références

- 1• J.M. Lattimer et M. Prakash, *Phys. Rept.*, **442** (2007) 109-165, et références indues.
- 2• W. Lewin et M. van der Klis, *Compact Stellar X-ray Sources*, Cambridge University Press (2010).
- 3• T. Strohmayer et L. Bildsten, "New views of thermonuclear bursts", dans ref. [2], pp. 113-156.
- 4• T. Strohmayer *et al.*, *ApJL*, **469** (1996) L9.
- 5• K.H. Lo *et al.*, *ApJ*, **776** (2013) 19.
- 6• C.W. Misner, K.S. Thorne et J.A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco (1973).

Modélisation des oscillations périodiques d'un sursaut X

Le cadre théorique pour l'élaboration d'un modèle basé sur l'émission d'une tache brillante à la surface d'une étoile en rotation rapide fut d'abord établi en 1973 par Misner *et al.* [6]. La compacité importante de l'étoile à neutrons implique un cadre d'étude relativiste et l'utilisation d'un espace-temps dit de Schwarzschild, dont la déformation sous l'effet de la compacité (rapport masse/rayon) de l'étoile permet aux trajectoires des photons de se courber.

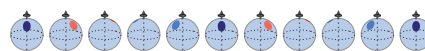
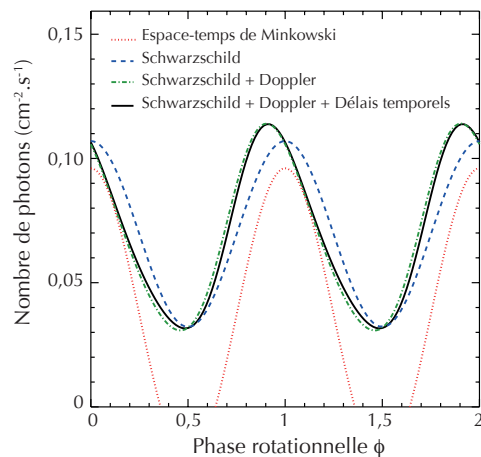
La figure E1 schématise un tel effet de courbure de la lumière. En supposant un observateur situé à une distance très grande, les conséquences de cet effet font que des photons émis par la tache lorsque celle-ci est située sur la face cachée de l'étoile parviennent tout de même jusqu'à l'observateur. Cette courbure est d'autant plus importante que la compacité de l'objet est grande.



E1. Trajectoire courbée d'un photon émis par la face cachée d'une étoile à neutrons. Cette courbure augmente avec la compacité de l'étoile.

La rotation rapide de l'étoile à neutrons a pour effet que la vitesse du point de la surface d'où est émis le photon soit proche de la vitesse de la lumière. Il faut donc calculer les effets Doppler relativistes : l'intensité du flux augmente et l'énergie des photons croît à mesure que la tache se déplace « vers » l'observateur. C'est l'inverse lorsque la tache « s'éloigne ».

Sur la figure E2, ces principaux effets sont illustrés pour un exemple typique d'étoile à neutrons (une masse égale à 1,5 masses solaires et un rayon de 12 km). La sinusoïde en pointillés rouges est calculée dans un espace pseudo-euclidien, qui ne tient pas compte des effets de la relativité générale, pour une étoile quasi statique ; le flux s'annule donc durant la période du cycle où la tache est située sur la face cachée de l'étoile. Pour la courbe en tirets bleus, on se place dans l'espace-temps de Schwarzschild ; la courbure de la lumière a pour effet que le flux ne s'annule plus et l'amplitude relative des oscillations diminue. La courbe en tirets-pointillés verts tient compte des effets Doppler ; il en résulte principalement que les profils d'oscillations deviennent asymétriques. Sous ce graphe, l'évolution correspondante de la tache au cours du cycle rotationnel est représentée. La couleur de la tache est d'autant plus bleue que sa vitesse en direction de l'observateur est importante. À l'inverse, elle est d'autant plus rouge que la vitesse d'éloignement est grande. Finalement, les délais temporels relativistes subis par les photons (effet Shapiro) lors de leur traversée du champ gravitationnel fort sont montrés sur la courbe en trait continu noir. Il s'agit d'une correction relativement mineure, qui tient compte de la distorsion du temps à proximité de l'objet compact. D'autres effets peuvent aussi modifier le profil des oscillations, comme l'angle d'observation de la tache, sa taille et sa température de surface, entre autres.



E2. Déformation des profils des oscillations de l'émission d'une tache chaude située sur une étoile en rotation rapide, sous les effets de la relativité.