



Astres de haute énergie : des sources de surprises

Les « cadavres » d'étoiles, objets peu visibles et d'une extrême densité, peuvent devenir de puissantes sources de rayonnement s'ils sont associés à une étoile compagne. Grâce aux nouveaux moyens d'observation, le bestiaire de ces astres de haute énergie n'en finit pas de s'enrichir.

Vue d'artiste d'un système binaire de grande masse, composé d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante.

L'étoile à neutrons accrète de la matière du vent stellaire, dense et inhomogène, éjecté par l'étoile supergéante.

L'étude des astres de haute énergie permet non seulement d'accéder à la physique de la matière condensée mais aussi à celle des plasmas de très haute température. Ces objets sont idéaux pour mieux comprendre les phénomènes d'accrétion-éjection et, dans certains cas, les vents stellaires d'étoiles massives.



S. Chaty/ESA

À la fin de leur évolution, certaines **étoiles** se transforment en objets extrêmement compacts : **naines blanches**, **étoiles à neutrons** ou **trous noirs stellaires**. Ces trois types d'astres se distinguent par leur densité. Une naine blanche contient typiquement la **masse du Soleil** dans une sphère d'environ 6 000 km de rayon. Une étoile à neutrons confine une masse comparable dans une sphère de seulement 15 km de rayon. Enfin un trou noir de 10 masses solaires aurait un « rayon » de 30 km (correspondant à l'**horizon des événements**). Ces étoiles « mortes » n'émettent que peu de rayonnement lorsqu'elles sont isolées, ce qui les rend peu visibles ou même invisibles à nos yeux. En revanche, ces objets peuvent devenir extrêmement **brillants** s'ils sont l'une des composantes d'un **système binaire**, c'est-à-dire s'ils sont liés par **gravité** à une étoile compagne dont ils attirent la matière. Un tel système s'appelle « variable cataclysmique » si l'objet compact est une naine blanche, ou « binaire X » dans le cas d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Cet article s'intéresse aux binaires X.

De puissants émetteurs

La chute de matière transforme une partie de l'énergie potentielle de **gravitation** en énergie rayonnée. Étant donné l'extrême densité de l'objet, la matière atteint des températures très élevées (environ 10 millions de degrés) et émet des **rayons X**. D'où le nom de ces systèmes. Lorsque le compagnon est une **étoile massive** (de masse supérieure à une dizaine de fois celle du Soleil), il engendre un **vent stellaire** intense que l'objet compact intercepte et **accrète** directement. De tels objets brillent peu, et peuvent même être enfouis dans le vent stellaire. Si au contraire l'astre compagne est moins massif que le Soleil, l'objet compact arrache de la matière à ses couches externes. En raison de la conservation du **moment cinétique**, cette matière en provenance d'une étoile en rotation dans un système binaire ne peut pas tomber directement sur l'objet compact. Un **disque d'accrétion** se forme donc : la matière parcourt une spirale, se rapprochant peu à peu de l'objet compact tout en s'échauffant... et en émettant un copieux

flot de rayons X. De plus, une couronne d'**électrons relativistes** englobe l'objet central et émet des **rayons X** et **gamma** par **effet Compton inverse** (figure 1). Pour caractériser ces astres de haute énergie et leur environnement, les astronomes utilisent donc des télescopes à rayons X et gamma, comme XMM-Newton et INTEGRAL auxquels le CEA/Irfu a largement contribué (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), mais aussi des détecteurs d'**ondes radio** et de **rayonnements infra-rouges/visibles**.

La découverte de microquasars

Au-delà de l'image du trou noir accrétant de la matière d'une étoile compagnon, des astrophysiciens du CEA/Irfu ont montré dans les années 1990 que de tels objets pouvaient éjecter massivement du **plasma** sous forme de jets à des vitesses apparemment supérieures à celle de la lumière (figure 1). Ces astres furent appelés microquasars par analogie avec les **quasars**, noyaux actifs de **galaxies** contenant en leur centre un trou noir supermassif (d'une masse de l'ordre de quelques millions à quelques milliards de fois celle du Soleil). Cette découverte révolutionna les recherches dans ce domaine. En effet, il pourrait exister une universalité des mécanismes physiques entre ces deux populations de trous noirs. Or les manifestations physiques au sein des microquasars se déroulent sur des échelles de temps réduites (de la milliseconde à l'année). Cela permet enfin d'étudier, même indirectement, des phénomènes similaires à ceux se produisant au sein des noyaux actifs de galaxies... mais sur des durées tellement longues qu'elles sont inaccessibles à l'échelle humaine. Diverses propriétés du flot (ou courant) d'accrétion se firent alors jour, et il devint évident que le disque était fortement couplé aux jets relativistes par l'intermédiaire d'une couronne d'électrons chauds qui alimente ces derniers (figure 1). En outre, la présence de matière **ionisée** au sein du disque d'accrétion induit la formation de **raies** de matériaux comme le fer. Les effets gravitationnels dus à l'objet compact modifient le profil d'émission de la matière du disque en rotation. À l'avenir, grâce entre autres à XEUS (*X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission*)/IXO (*International X-ray Observatory*), ces **raies d'émission** renseigneront les astronomes sur la vitesse de rotation des trous noirs, un de leurs trois paramètres fondamentaux avec la masse et la charge électrique.

La découverte de diverses corrélations (flux dans différentes bandes d'énergie, fréquences d'oscillations quasi périodiques, caractéristiques spectrales, etc.) démontra de plus que ces jets de matière peuvent émettre dans les domaines X et gamma, soit bien au-delà de leur domaine classique de rayonnement en ondes radio. En quelques années, les jets relativistes se sont donc révélés comme de puissants émetteurs multi-longueurs d'onde. La découverte directe d'une émission de rayons X lors de leur interaction avec le **milieu interstellaire** le confirma (figure 2). Elle prouva en effet sans ambiguïté que ces jets contiennent des particules de très hautes énergies ($> \text{TeV}$). Une émission jusqu'aux rayons gamma est possible : des

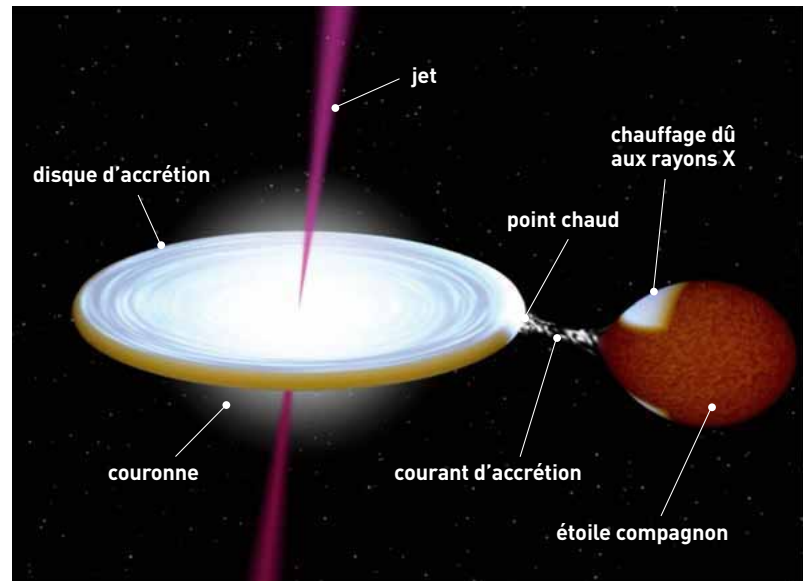


Figure 1. Vue d'artiste d'un microquasar. La matière arrachée de l'étoile compagnon tombe dans le trou noir dans un mouvement en spirale. Un disque se forme autour de l'astre dense et des jets de matière apparaissent.

observatoires tels que Fermi ou HESS pourraient alors les détecter (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

Des quasars « intermédiaires » ?

Un nouveau mystère est apparu ces dernières années. Les puissants observatoires actuels, comme XMM-Newton, ont détecté des sources très importantes de rayons X dans de nombreuses galaxies proches de la **Voie lactée**. Or ces objets semblent bien trop **lumineux** pour être assimilés à des systèmes binaires X. D'où l'idée qu'il pourrait s'agir de trous noirs d'une masse intermédiaire entre celle des microquasars et celle des noyaux actifs de galaxies, soit de quelques centaines à quelques milliers de fois celle du Soleil. Néanmoins, les théories actuelles expliquent difficilement la

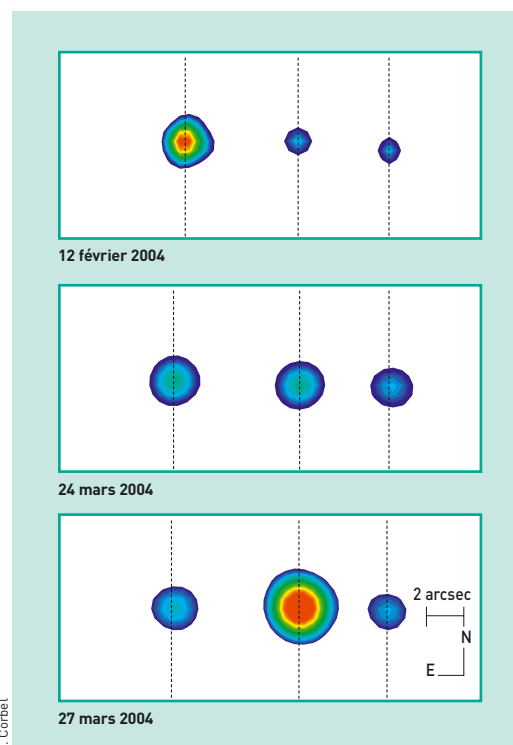


Figure 2. Image de l'émission X autour du microquasar H 1743-322. De part et d'autre de la source centrale, on observe deux sources X mobiles dues à l'interaction de bulles de plasma relativiste avec le milieu interstellaire.

S. Corbel

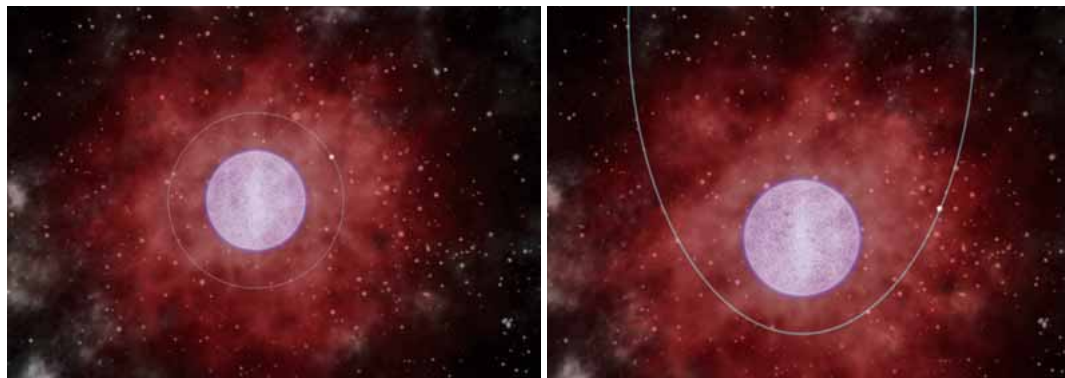


Figure 3.

À gauche, un astre enfoui, où l'étoile à neutrons orbite près de l'étoile supergéante, constamment à l'intérieur du vent stellaire. À droite, une « transitoire rapide », où l'étoile à neutrons, sur une orbite excentrique, pénètre régulièrement dans le vent de l'étoile.

formation de tels trous noirs. Les observations multi-longueurs d'onde apporteront un nouvel éclairage sur ces astres. Soit elles prouveront l'existence d'une nouvelle classe d'objets exotiques, soit il faudra revoir certaines théories admises concernant les disques d'accrétion.

Des sources mystérieuses

À l'intérieur même de la Voie lactée, l'observatoire INTEGRAL a lui aussi découvert, en janvier 2003, un nouveau type de sources de rayons X. Elles sont concentrées dans le plan galactique, et principalement dans la direction des bras. Un programme intensif d'observations a alors été lancé, et les observatoires XMM-Newton, Chandra et Swift ont localisé précisément une trentaine des sources découvertes par INTEGRAL. Les informations spectrales ont révélé que beaucoup d'entre elles présentent une forte **absorption** intrinsèque, inhabituelle pour des astres de haute énergie. Cela constitua une première surprise, mais d'autres allaient suivre...

En plus de ces observations des rayons X, les astrophysiciens du CEA/Irfu ont entrepris un programme multi-longueurs d'onde afin de révéler la nature de ces sources. Cette étude combine, pour un échantillon de ces objets, une **astrométrie** précise, une **photométrie** et une **spectroscopie en lumière visible** et **infrarouge (proche et moyen)**. Ici survint la deuxième surprise : la majorité de ces objets sont des systèmes binaires de grande masse comprenant des étoiles **supergéantes** – étoiles très évoluées sorties de la **séquence principale** – alors qu'avant le lancement d'INTEGRAL, la plupart des systèmes binaires massifs connus contenaient des étoiles Be – étoiles de la séquence principale de **type spectral** précoce, en rotation tellement rapide sur elles-mêmes qu'elles créent un disque de matière les entourant.

De surprise en surprise

Ces nouveaux astres de haute énergie semblent intrinsèquement obscurcis, c'est-à-dire qu'eux-mêmes absorbent une partie de leur rayonnement. L'astre IGR J16318-4848 en constitue un exemple extrême : il s'agit d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante d'un type spectral très rare, noté sgB[e] à cause de la présence de raies d'émission

« interdites »⁽¹⁾. Les observations dans l'infrarouge moyen ont montré que ces objets apparaissent obscurcis à cause de la présence de matériau absorbant (poussière et/ou gaz froid) entourant le système binaire dans son ensemble. L'étoile à neutrons orbite donc à l'intérieur d'un cocon de gaz froid formé par le vent de l'étoile supergéante.

Enfin, une troisième caractéristique révélait une sous-population encore plus inhabituelle parmi ces objets. Certaines de ces sources présentent en effet des sursauts d'activité très rapides, de l'ordre de l'heure, et se produisant de manière apparemment anarchique. Ces astres ont été nommés « transitoires rapides de rayons X à supergéante ». L'archétype en est IGR J17544-2619.

L'échantillon de sources étudiées s'amplifiant, il apparaît maintenant que les différences entre les astres enfouis et les transitoires rapides proviennent essentiellement de caractéristiques orbitales (figure 3). En effet, les astres enfouis s'apparentent aux systèmes binaires de grande masse classiques, contenant une supergéante avec une étoile à neutrons parcourant une orbite très proche, à 2 ou 3 rayons stellaires seulement. L'accrétion de matière – à partir du vent de l'étoile – se fait donc en permanence, et l'émission en rayons X est persistante. Les « transitoires rapides » sont des systèmes où l'étoile à neutrons se trouve loin de l'étoile compagne, sur des orbites circulaires ou excentriques. C'est lorsque l'objet compact traverse le vent de l'étoile, inhomogène et parsemé de grumeaux, que se produisent les sursauts rapides d'activité. Quand il se trouve loin de l'étoile, en revanche, il n'y a pas ou peu d'émission de rayons X.

Finalement, il semble qu'il existe dans la nature un continuum de ces systèmes binaires de grande masse, dont les caractéristiques d'émission dépendent de la proximité entre objet compact et étoile compagne, et de la nature de l'orbite. C'est donc l'interaction entre les deux composants du système qui régit les propriétés de ces astres de haute énergie.

➤ Sylvain Chaty, Stéphane Corbel et Jérôme Rodriguez

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Raies spectrales émises par un atome se désexcitant selon un mode très peu probable.