

Le télescope Sigma et les représentations de l'Univers

Jacques Paul

L'astronomie gamma, fille de la conquête spatiale

L'astronomie est avant tout une science du regard, basée sur la collecte des ondes électromagnétiques qu'émettent les corps célestes. Les explorations in-situ, menées à l'occasion de quelques missions planétaires, restent en effet l'apanage du seul système solaire. Quant aux recherches portant sur les rayons cosmiques, les neutrinos et les ondes gravitationnelles, elles se limitent pour l'heure au sondage de quelques sites cosmiques très particuliers.

Tributaires pour l'essentiel du rayonnement électromagnétique, les astronomes n'ont que très récemment étendu leur regard au delà du domaine visible. On dénomme ainsi cette demi-décade du spectre qui rassemble les rayonnements propres à impressionner aussi bien la rétine de l'œil que la plupart des émulsions photographiques. Il existe pourtant toute une panoplie d'objets célestes qui rayonnent très peu — voire pas du tout — dans le visible, mais qui brillent d'un vif éclat dans d'autres domaines de longueurs d'onde. C'est par exemple le cas de tous les milieux portés à des températures très différentes de celle du Soleil, l'astre à la lumière duquel notre œil s'est adapté. Il en est ainsi des corps célestes beaucoup plus froids, comme les poussières interstellaires, ou beaucoup plus chauds, comme les disques de plasmas qui ceignent certaines étoiles effondrées. Mais il est en général très difficile d'observer tous ces types d'astres depuis le sol car l'atmosphère terrestre constitue un écran opaque à la plupart des rayonnements. Sont ainsi irrémédiablement bloqués dans la haute atmosphère ceux dont la longueur d'onde est plus courte que celle de la lumière visible.

Au début des années soixante, la recherche spatiale naissante offrit aux astronomes l'opportunité de propulser leurs télescopes au delà de l'atmosphère pour observer enfin le ciel sur toute la gamme des rayonnements. Aujourd'hui, observatoires terrestres et spatiaux se complètent pour scruter le cosmos sur plus de vingt décades du spectre électromagnétique, des bandes radio jusqu'aux domaines des rayons X et des rayons gamma. Il s'agit là d'une révolution majeure, encore plus considérable que celle qui vit Galilée braquer une longue vue vers le ciel.

L'astronomie des rayons gamma¹ est sans conteste l'une des plus ardues de ces nouvelles astronomie spatiales, en raison même des propriétés physiques qui font des rayonnements à très courte longueur d'onde un domaine bien à part du spectre électromagnétique. Mis en service au début de 1990, le télescope spatial Sigma, opérant à la lisière du domaine gamma, permet enfin de pratiquer une véritable astronomie dans ce secteur spectral si rébarbatif. Or c'est justement à la frontière des rayons X et gamma que les astronomes ont les meilleures chances de dénicher ces astres sortis tout droit des théories enfantées dans les années trente, astres dont les pères fondateurs de la physique moderne osaient à peine envisager l'existence, avec au premier rang, les trous noirs stellaires.

¹ À l'instar de la lumière et de tous les rayonnements électromagnétiques, les rayons gamma sont des particules élémentaires, les photons, se déplaçant à très grande vitesse et présentant les caractères d'une onde. Mais au contraire des autres composantes du spectre électromagnétique, où les rayonnements sont en général définis par leur longueur d'onde ou leur fréquence, on a pris l'habitude de caractériser les rayons gamma par l'énergie E_γ des photons qui leur sont associés, en fonction de la relation suivante (dite de Planck-Einstein) : $E_\gamma = h\nu$ ou $E_\gamma = hc/\lambda$, h étant la constante de Planck, ν la fréquence du rayonnement, λ sa longueur d'onde, et c la célérité de la lumière. Les énergies des photons gamma sont exprimées en multiples de l'électronvolt ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Un photon de 30 keV, à la frontière des domaines X et gamma, est donc associé à un rayonnement de $4,133 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ de longueur d'onde ou de $7,254 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$ de fréquence.

Sigma, un télescope sans miroir ni lentille

Observer le ciel dans le domaine gamma est une entreprise des plus ingrates. En effet, avec leur longueur d'onde inférieure aux distances qui séparent les atomes, les rayons gamma ne se prêtent pas aux combinaisons de miroirs qui sont à la base des télescopes opérant dans les autres domaines spectraux. Depuis les débuts de l'ère spatiale, les astronomes voulant observer dans la bande des rayons gamma de basse énergie se sont donc résignés à utiliser des dispositifs assez rudimentaires, basés sur la seule collimation du rayonnement incident. Un collimateur, fait d'un tube aux parois absorbantes, est disposé face à un compteur de photons gamma, et seuls sont enregistrés les photons se propageant plus ou moins parallèlement à l'axe du tube. On mène alors une première pose en pointant le collimateur en direction d'un champ du ciel supposé contenir une source de rayons gamma cosmiques. Au cours de cette pose, on mesure un taux de comptage qui combine la contribution de la source et celle du bruit de fond. Puis on mène une deuxième pose en pointant cette fois un champ adjacent, supposé vide de source, afin d'estimer la contribution du seul bruit de fond. Le signal induit par la source résulte alors de la soustraction des deux taux de comptage ainsi obtenus. Cette méthode permet de localiser la source en question avec une précision d'autant plus grande que l'ouverture du collimateur est petite, la seule limitation étant la nécessité de maintenir un diamètre de tube assez large pour que l'appareil puisse collecter un nombre significatif de photons.

En raison de la grande énergie qu'emporte chaque photon gamma, les sources cosmiques actives dans la bande des rayons gamma de basse énergie induisent en effet des flux de photons toujours très faibles, de l'ordre d'un photon par centimètre carré et par seconde dans le cas des sources les plus brillantes. On est donc conduit à utiliser des tubes collimateur assez ouverts, la conséquence étant une mesure de la position des sources sur la voûte céleste avec une précision à peine meilleure qu'un degré — deux fois le diamètre apparent de la Lune. Il s'agit là de performances bien trop modestes pour entreprendre une étude détaillée de astres émetteurs de rayons gamma. Produire des images sans miroir ni lentille est pourtant possible grâce aux dispositifs à ouverture codée. Dans son principe, un télescope à ouverture codée s'inspire de la chambre noire (ou caméra à trou d'épingle) qu'utilisèrent les premiers photographes. En perçant un trou dans la face avant d'une boîte constituée d'un matériau opaque, et en disposant une plaque sensible sur la face opposée, on réalise une chambre photographique très primitive, qui permet cependant de former des images d'autant plus nettes que le trou est petit. Rien n'empêche alors de transposer ce dispositif dans le domaine gamma. Il suffit pour cela d'utiliser un matériau à numéro atomique élevé, comme le plomb ou le tungstène, et de remplacer l'émulsion photographique par une couche détectrice sensible au rayonnement gamma. On accroît la luminosité des images sans perdre en finesse en perçant la face avant d'un grand nombre de trous, disposés suivant un code précis. Ce dernier est choisi afin de pouvoir décoder l'image complexe ainsi formée par cette multitude de trous à l'aide d'un algorithme mathématique simple.

En 1981, avec Pierre Mandrou du Centre d'Étude Spatiale des Rayonnement (C.E.S.R.) à Toulouse, je proposai au Centre National d'Études Spatiales (Cnes) l'avant-projet d'un appareil basé sur ce principe, capable donc de fournir des images du ciel à haute résolution dans la bande de 35 keV à 1,3 MeV. Ce télescope, dénommé Sigma, acronyme pour Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire, fut réalisé de 1983 à 1988 sous la maîtrise d'œuvre du Cnes qui confia au C.E.A. et au C.E.S.R. la réalisation des sous-systèmes scientifiques. Mis en orbite le 1er décembre 1989 à bord du satellite russe Granat, Sigma poursuivit jusqu'en 1998 une série impressionnante d'observations du ciel gamma. La mission a donc largement dépassé les objectifs initiaux d'une durée de vie de seulement 18 mois, ce qui a permis de scruter une centaine de champs distincts du ciel, avec une précision de localisation pouvant atteindre 30 secondes d'arc dans le cas des sources les plus brillantes. C'est un progrès de deux ordres de grandeur par rapport aux autres dispositifs opérant dans la même bande spectrale, comme les expériences Batse et Osse à bord de l'observatoire américain à rayons gamma Compton. Optimisé pour produire des images dans la bande des rayons gamma de basse énergie, Sigma s'avéra un véritable traqueur de trous noirs d'origine stellaire, au point que plus du quart des sources déjà détectées sont à ranger dans la catégorie des trous noirs stellaires accrétants.

La signature gamma des trous noirs stellaires accrétants

Chaque fois que les astronomes abordent un nouveau domaine spectral, ils découvrent de nouveaux types d'astres, dont parfois ils ne soupçonnaient même pas l'existence. Ce fut le cas dans les années soixante, quand les premières observations spatiales révélèrent l'exceptionnel éclat que suscitent dans la bande des rayons X certains couples stellaires dont l'une des composantes est un astre effondré, étoile à neutrons ou trou noir². Le débit d'énergie que rayonnent les plus brillantes parmi ces sources de rayons X cosmiques, de l'ordre de 10³¹ watts, équivaut à plus de dix mille fois celui de notre Soleil. Or à l'exception de certains pulsars aptes à récupérer une fraction de l'énergie cinétique stockée dans une étoile à neutrons en rotation rapide, les étoiles effondrées rayonnent très peu — voire pas du tout dans le cas des trous noirs. Elles n'en continuent pas moins d'exercer une très forte attraction sur la matière qui passe à leur portée. Si par exemple l'astre compact appartient à un système double, les couches externes de l'étoile compagnon peuvent, dans certaines conditions, s'engouffrer dans le puits de potentiel gravitationnel induit par l'étoile à neutrons ou par le trou noir. Cet afflux de matière forme autour de l'étoile effondrée une couronne massive de plasma, le disque d'accrétion. Sous l'effet de violents phénomènes de friction, la température des zones les plus internes du disque s'élève au point d'induire un intense rayonnement dont l'essentiel tombe dans la bande des rayons X.

Les astronomes ont répertoriés dans notre galaxie, la Voie lactée, plusieurs centaines de ces binaires X. Mais jusqu'aux observations spatiales les plus récentes, il restait très difficile dans la plupart des cas de déterminer sans ambiguïté la nature de l'astre accrétant en s'en tenant aux seules caractéristiques de son émission à haute énergie. On peut certes s'assurer de la nature étoile à neutrons d'un astre compact accrétant dans le cas particulier d'une émission périodique à courte période (d'une fraction de seconde à quelques centaines de secondes). Seule une étoile à neutrons en rotation rapide peut en effet susciter une telle émission. Encore faut-il qu'elle soit dotée d'un champ magnétique intense, apte à canaliser la matière accrétée : cette dernière forme alors une sorte de colonne, dont la base, la zone la plus dense et la plus chaude, confine le milieu émissif à haute énergie. En raison de la taille extrêmement réduite de la colonne, la température du milieu peut s'élever au point de susciter une émission gamma. On connaît à ce jour une vingtaine de ces pulsars accrétants, quelques uns d'entre eux étant suffisamment actifs pour se manifester dans le domaine spectral de Sigma. On est également certain qu'une source apte à produire d'une manière répétitive de brusques bouffées de rayonnement X est suscitée par une étoile à neutrons accrétante. On attribue en effet ces sursauts répétitifs à des processus de détonation thermonucléaire de la matière accrétée, comprimée à la surface d'une étoile à neutrons faiblement magnétisée. On connaît quelques dizaines de ces sursauteurs X, dont certains suscitent une émission détectable par Sigma³.

Tout astre compact dont la masse serait de plus de 2 à 3 fois la masse du Soleil ne peut se présenter qu'à l'état de trou noir. En effet, les conditions physiques qui règneraient au sein d'une étoile à neutrons dont la masse dépasserait cette limite du Soleil entraîneraient que la célérité du son y serait supérieure à celle de la lumière. Fort de ce critère de masse, on peut donc garantir la nature trou noir d'un astre accrétant pour peu que sa masse s'avère supérieure à trois fois la masse du Soleil. L'estimation de la masse d'un astre compact en système binaire passe en général par des observations dans le visible, afin de préciser la masse de l'étoile compagnon ainsi que la période orbitale du système. Mais dans le cas d'un compagnon de petite masse (inférieure ou égale à celle du Soleil), ces observations sont rendues très difficiles du fait que, même dans le visible, l'émission du disque d'accrétion ceinturant l'astre compact domine largement celle de l'étoile compagnon. Et comme le domaine des rayons X n'offre pas de critères fiables pour identifier sans équivoque un trou noir stellaire accrétant, la mise en évidence des trous noirs dans les binaires X ne pris

² Quand les réactions nucléaires s'éteignent au cœur des étoiles, il ne subsiste plus aucune source d'énergie pour contrebalancer l'effondrement gravitationnel du gaz dont elles sont constituées. L'effondrement d'une étoile de faible masse (comme le Soleil), débouche sur la formation d'une naine blanche, dont le rayon est de l'ordre de 10 000 km. Dans le cas des étoiles plus massives, la contraction du cœur stellaire se poursuit jusqu'à constituer une étoile à neutrons, avec un rayon de l'ordre de 10 km. Pour les plus massives, rien ne peut arrêter la contraction du cœur. Le champ de gravitation devient si intense qu'en deçà d'un rayon critique de quelques kilomètres, la lumière elle-même ne peut plus s'échapper. Le cœur de l'étoile est devenu un trou noir.

³ Les sursauteurs X n'ont rien à voir avec les sursauteurs gamma, ces sources d'intenses bouffées de rayons gamma qui signeraient la phase finale de l'évolution de certains types d'étoiles.

son essor qu'à la suite de la mise en service d'instruments aptes à opérer au delà de quelques dizaine de kiloélectronvolts.

Contrairement aux étoiles à neutrons accrétantes, seuls les trous noirs accrétants semblent en mesure de susciter un rayonnement s'étendant largement au delà de la frontière que nous avons assigné au domaine gamma. On admet en effet que l'équilibre thermique des disques d'accrétion ceinturant les étoiles effondrées est gouverné par la diffusion Compton des photons sur un gaz d'électrons chauds. Que ce soit une étoile à neutrons ou trou noir, l'astre accrétant reçoit un flux abondant de rayons X émis par le bord interne du disque. Comme elle oppose une surface matérielle à ce rayonnement X incident, une étoile à neutrons renvoie donc vers le disque un flux notable de photons de plus basse énergie. Par diffusion Compton, les photons en question contribuent à refroidir la température du bord interne du disque, et ce dernier n'est donc pas en mesure de rayonner au delà de la limite du domaine gamma. Au contraire, comme il capture tout le rayonnement qu'il reçoit, un trou noir ne renvoie aucun photon. Pour refroidir le bord interne du disque, il ne faut plus compter que sur les seuls photons X de basse énergie émis à la périphérie. Les zones les plus interne du disque, dont la température atteint des centaines de millions de kelvins, peuvent alors rayonner en abondance des photons gamma d'énergie largement supérieure à 100 keV. Les observations du télescope Sigma, un appareil parfaitement ajusté à cette gamme spectrale, sont donc le moyen le plus efficace pour découvrir les trous noirs stellaires accrétants, sur la seule base de leur grande luminosité gamma.

Trous noirs et novas gamma

Sept des dix spécimens de trous noirs stellaires accrétants qui composent le tableau de chasse de Sigma sont des novas gamma. On désigne ainsi, par analogie avec les novas observées dans le visible, les sources dont l'éclat au delà de la limite assignée au domaine gamma s'accroît de plus de deux ordres de grandeur en quelques jours avant de décroître, d'une manière plus ou moins régulière, avec des constantes de temps de plusieurs dizaines de jours. Avant l'éruption, comme après la phase de déclin, les novas gamma présentent un flux généralement inférieur à la limite de détection des appareils. C'est en janvier 1991 que les astronomes de Sigma furent pour la première fois confrontés à ce type de manifestation, aussi spectaculaire qu'inattendue. Depuis la mise en orbite de Granat, des équipes françaises assurent le contrôle de Sigma et le suivi des observations du télescope dans les locaux même de la station de réception des données, située à Evpatoria, en Crimée. En dépouillant les données recueillies du 9 au 10 janvier 1991, l'équipe en station détecta une source très brillante, puisqu'encore visible à près de 9 degrés du centre du champ, là où la sensibilité de l'instrument n'atteint même pas le dixième de sa valeur dans l'axe. Avec un éclat supérieur à celui de la nébuleuse du Crabe, cette source, localisée dans la constellation australe de la Mouche, était alors l'une des plus brillantes du ciel dans la bande des rayons gamma de basse énergie. Un jour auparavant, deux appareils opérant dans le domaine des rayons X, l'instrument Watch — une caméra danoise à grand champ montée à bord de Granat — et le satellite japonais Ginga, avaient aussi détecté dans la même zone du ciel une émission de rayons X dont le flux allait croissant. Comme il se doit, ces découvertes furent immédiatement publiées par le truchement de circulaires de l'Union Astronomique Internationale (U.A.I.), distribuées aussitôt à tous les observatoires de la planète par les bons soins du réseau Internet. Quelques jours plus tard, alertés par les circulaires U.A.I., les astronomes de l'Observatoire Européen Austral, au Chili, repéraient dans le visible la trace de cette étoile nouvelle, la nova de la constellation de la Mouche, alias Nova Muscæ 1991 suivant la terminologie latine toujours en cours chez les astronomes.

Du 16 au 21 janvier, Sigma observa à trois reprises la nova de la Mouche dans de bien meilleures conditions. La source étant bien calée au centre du champ, nous pûmes alors estimer avec une grande précision sa position sur le ciel : telles que mesurées par Sigma, les coordonnées célestes de Nova Muscæ 1991 s'avèrent identiques, à une minute d'arc près, à celles déterminées par les astronomes de l'Observatoire Européen Austral. L'analyse des trois observations montra que le flux de la source vers 100 keV s'était établi à une valeur nettement plus faible que début janvier (le tiers de celui de la nébuleuse du Crabe), avec toutefois des variations de grande amplitude (près de 60% en moins de 15 heures). Lors de la dernière pose du mois, du 20 au 21 janvier 1991, Nova Muscæ 1991 connut un intense épisode éruptif à haute énergie, bien détecté au vu des images produites dans la bande 450-550 keV. Une étude détaillée montra alors que ce surcroît d'émission gamma se manifesta sous la forme d'une raie spectrale, centrée vers

500 keV, et qui aurait été donc produite par des processus d'annihilation matière-antimatière mettant en jeu des électrons et leurs antiparticules, les positons. En s'en tenant aux seules observations menées dans le domaine des rayons X, la nova de la Mouche se présenta comme une source X transitoire d'un type assez courant, associant une étoile de faible masse et un astre compact accrétant. En temps normal, le transfert de matière de l'étoile vers l'astre compact est trop faible pour que le disque d'accrétion puisse émettre un flux détectable. Pour expliquer le phénomène observé, on invoque en général un brutal accroissement du taux d'accrétion provoqué par des instabilités dont on ignore encore la nature profonde. C'est à plus haute énergie que la nova de la Mouche révèle sa véritable nature : les observations de Sigma, montrant que l'émission de la source s'étend largement au delà de 100 keV, poussent en effet à la ranger dans une catégorie plus restreinte, celle où l'astre accrétant est un trou noir. Un an plus tard, des astronomes opérant dans le visible parvinrent à estimer la masse de l'objet compact, qui s'avéra effectivement supérieure à trois masses solaires, confirmant ainsi la nature trou noir de l'astre accrétant.

En s'appuyant sur la souplesse du groupe opérationnel russe en poste à la station d'Evpatoria, nous bouleversâmes à plusieurs reprises le programme de Sigma afin d'observer d'autres novas gamma. Les plus brillantes se manifestèrent en août 1992 dans la constellation de Persée (Nova Persei 1992) et en septembre 1993 dans le Serpente (Nova Ophiuchi 1993). Sur la base de leur comportement spectral, toutes deux furent identifiées comme de sérieux candidats trou noir. La découverte de Nova Ophiuchi 1993 se produisit le dimanche 26 septembre 1993, quand l'équipe française de permanence à Evpatoria prit connaissance des données enregistrées la veille à bord de Granat : une nouvelle source se manifestait avec éclat dans la constellation du Serpente, au bord d'un champ céleste que le télescope Sigma scrutait déjà depuis un mois. En examinant les images produites en station par un modeste micro-ordinateur portable, l'équipe Sigma discerna aussitôt la signature spectrale d'un trou noir, à savoir une émission de photons dont l'énergie s'étendaient largement au delà de 100 keV. La position sur le ciel de ce nouveau candidat fut alors mesurée avec une telle précision que maints télescopes opérant dans d'autres domaines spectraux ne tardèrent pas à en détecter l'empreinte. Les deux dernières novas à trou noir découvertes par Sigma (Nova Scorpii 1994b et Nova Ophiuchi 1996) présentent la particularité d'avoir été toutes deux localisées dans le bulbe galactique, ce renflement central de notre galaxie que Sigma surveille régulièrement depuis 1990 [voir illustration 3]. Les deux novas en question se situent donc toutes deux grosso modo à la même distance, celle des régions centrales de la Galaxie (environ 25 000 années de lumière). Et comme elles brillèrent toutes deux d'un même éclat apparent, on peut raisonnablement en conclure que toutes les novas gamma présentent à leur maximum d'éclat la même luminosité absolue dans le domaine des rayons gamma de basse énergie. Avec Sigma, les astronomes disposent donc d'un outil permettant non seulement d'identifier les novas à trou noir, mais aussi d'en mesurer approximativement la distance. Rien n'empêche alors d'évaluer la densité des novas gamma dans le disque galactique, et partant, leur quantité totale, sachant, qu'en moyenne, chacune d'entre elles connaît une phase éruptive deux à trois fois par siècle. On estime ainsi qu'un millier de novas à trou noir résident dans la Galaxie.

Des microquasars au cœur de la Voie lactée

Les observations du télescope Sigma furent bien sûr concentrées sur les champs les plus prometteurs, avec, en première priorité, le bulbe galactique. On désigne ainsi une structure vaguement sphérique, dont le rayon vaut environ trois mille années de lumière, et qui s'étend sur une quinzaine de degrés dans les constellations du Sagittaire, du Serpente et du Scorpion. Le bulbe galactique est surtout constitué d'étoiles ; sa masse est d'environ dix milliards de fois celle du Soleil. Il s'agit là d'une fraction non négligeable de toute la masse «visible» de la Galaxie. On ne sait pas encore si le bulbe galactique est une entité à part entière, ou une région de transition entre le halo sphérique de très vieilles étoiles qui nimbe la Galaxie et le noyau galactique, avec sa population stellaire à nulle autre pareille et l'éventuel trou noir super massif (quelques millions de masses solaires) qui y serait tapi. Le bulbe galactique n'en abrite pas moins une population stellaire à nulle autre pareille, avec une prédominance de sujets assez vieux : aucune étoile n'y est âgée de moins de cinq milliards d'années. Il n'est donc pas question d'y trouver des étoiles massives encore en activité, mais plutôt les résidus compacts de leur évolution, étoiles à neutrons et trous noirs. Pour des raisons tenant à l'éclairement optimal des panneaux solaires qui alimentent Granat en énergie électrique, le télescope Sigma ne pointa le cœur de la Voie lactée qu'à l'occasion de campagnes d'observations organisées

pendant les quelques semaines qui précèdent et suivent les deux équinoxes de Printemps et d'Automne. Avec les douze campagnes conduites depuis le lancement de Granat, nous disposons au total de plus de 2700 heures de données collectées dans la direction des régions centrales de la Galaxie. Pas moins de quinze sources gamma γ ont été identifiées, dont le tiers porte la signature spectrale des trous noirs stellaires accrétants. Parmi ces dernières, on compte deux spécimens dont l'émission est de nature persistante, bien qu'hautelement variable, et trois de type novae gamma. À l'exception de Nova Ophiuchi 1993, tous ces candidats trous noirs sont effectivement localisés dans le bulbe galactique, comme en témoignent les traces d'absorption interstellaire que l'on détecte dans leur émissions recueillies dans la bande des rayons X de basse énergie. En revanche, nous n'avons pas trouvé la moindre trace de ce trou noir géant, dont maints astronomes prédisent l'existence au centre dynamique de la Galaxie, et qui serait donc étrangement muet dans le domaine spectral couvert par Sigma.

Dès sa mise en service opérationnelle, en mars 1990, Sigma parvint à résoudre pour la première fois l'émission gamma des régions centrales de la Galaxie. Nous obtînmes alors une série d'images où apparut une source brillante, située à moins d'un degré du centre galactique, à la position de 1E 1740.7-2942, une anodine source de rayons X, découverte en 1979 par le satellite américain Einstein. Se caractérisant par une émission abondante au delà de 100 keV, 1E 1740.7-2942, surnommée très vite la source «Einstein» par l'équipe Sigma, fut aussitôt rangée parmi les sérieux candidats trou noir. Six mois plus tard, en octobre 1990, la source «Einstein» fut le siège d'un intense sursaut d'émission gamma, concentrée dans la bande 300-600 keV, et résultant probablement d'une annihilation massive de positons. L'année 1991 fut au contraire marquée par une phase prolongée d'inactivité, suivie d'une nette reprise enregistrée à partir de mars 1992. Baptisé pour la circonstance «grand annihilateur» par les astrophysiciens américains, la source «Einstein» fut la cible d'observations menées dans tous les domaines spectraux. La plus fructueuse fut sans conteste la campagne multi-longueurs d'onde conduite de 1991 à 1992 coté gamma, par l'équipe Sigma, et côté radio, au V.L.A. 4, par Félix Mirabel, du C.E.A.-Saclay et Luis Rodriguez de l'Institut d'Astronomie de Mexico. Elle déboucha sur l'identification de la source «Einstein» avec une source radio formée d'un système de jets bipolaires, émanant d'une radiosource compacte, et se terminant par deux lobes plus étendus. Tout au long de la campagne, nous constatâmes que l'éclat de la source à haute énergie et la brillance de la radiosource compacte évoluaient d'une manière simultanée. De telles variations corrélées d'intensité attestent à l'évidence que le trou noir stellaire accrétant, à l'origine du rayonnement détecté par Sigma, est aussi responsable de l'éjection d'électrons animés de vitesses proches de celle de la lumière. En rayonnant par effet synchrotron dans le domaine des ondes radio, ces électrons relativistes qu'éjecte la source centrale forment les jets radiaux qui apparaissent sur les images bâties avec les données recueillies au V.L.A.

Accrétion de matière par un trou noir et éjection de particules relativistes sont justement les deux processus physiques mis en avant pour interpréter l'ensemble des phénomènes observés dans les quasars. On désigne ainsi ces radiosources à l'aspect quasi stellaire, connues depuis le début des années soixante, que l'on détecte dans tous les domaines spectraux, des ondes radio jusqu'aux rayons gamma, et dont les spécimens les plus lointains marquent les confins de l'univers observable. La plupart des astronomes les considèrent des noyaux de galaxies tellement lumineux que leur éclat submerge celui de la galaxie hôte. Les quasars sont si lumineux que l'accrétion de matière par un trou noir ultra-massif (de 10⁶ à 10⁹ masses solaires) apparaît comme le seul mécanisme apte à convertir la matière en énergie rayonnée avec un rendement tel qu'il puisse opérer dans l'étroit périmètre compatible avec la variabilité de leurs émissions. À noter que maints quasars se distinguent en suscitant des éjections de matière qui se manifestent sous forme de jets, visibles en particulier sur les images produites dans le domaine radio. Produisant des manifestations du même type, comme en témoignent les observations du V.L.A., suscitée par un trou noir accrétant, comme l'atteste les données de Sigma, la source «Einstein» apparaît donc comme la réplique miniature — à l'échelle stellaire — d'un quasar, d'où ce nom de «microquasar» qui lui fut attribué dès la découverte des jets

⁴ Sigle pour Very Large Array, littéralement : « très grand réseau ». Cet interféromètre unique au monde, dont la base s'étend sur des dizaines de kilomètres dans les plaines de San Augustin, non loin de Socorro, dans le désert du Nouveau Mexique, comprend 27 antennes paraboliques de 25 mètres de diamètre chacune. Il permet de mener des observations dans le domaine radio avec un pouvoir séparateur d'une fraction de seconde d'arc.

radios qui lui sont associés. L'observation au V.L.A. des sources Sigma du bulbe galactique permit de repérer une deuxième manifestation radio du même type, corrélée cette fois avec GRS 1758-258, l'autre candidat trou noir à émission persistante identifié par Sigma dans les régions centrales de la Galaxie.

Les mouvements superluminiques de la nova de l'Aigle

En août 1992, la caméra danoise à grand champ Watch à bord du satellite Granat découvrait une nouvelle source de rayons X durs localisée dans la constellation de l'Aigle. Selon l'usage en vigueur chez les astronomes X et gamma, on affecta à cette nouvelle source le matricule GRS 1915+105, où les caractères GRS, contraction de Granat Source, sont suivis des coordonnées de la source exprimées dans le système équatorial à l'équinoxe 1950. Bien que son comportement temporel ait différé sensiblement de celui d'une nova gamma «classique» — une analyse ultérieure des données recueillies par l'expérience Batse à bord de l'observatoire américain à rayons gamma Compton montra en effet que son accroissement progressif d'éclat avait débuté dès mai 1992 —, GRS 1915+105 fut également répertoriée sous le nom de Nova Aquilæ 1992. Estimée à un degré près à partir des seules données collectées par Watch et Batse, la position de la nova de l'Aigle sur la voûte céleste était beaucoup trop mal connue pour pouvoir conduire des observations dans d'autres domaines spectraux, comme celui des ondes radio, où les champs de vue des télescopes les plus performants sont en général fort réduits. Il devint donc impératif d'observer GRS 1915+105 dans le domaine des hautes énergies avec un télescope à haute résolution angulaire comme Sigma, ce qui fut fait les 23 et 24 septembre 1992. L'examen des images ainsi recueillies nous permirent de localiser la source avec une précision de l'ordre d'une minute d'arc, et de constater que son comportement spectral était typique de ceux des trous noirs stellaires accrétants.

En possession de la position précise de la nova de l'Aigle, Félix Mirabel et Luis Rodriguez entamèrent au V.L.A. une surveillance systématique dans le domaine radio. Ce programme fut couronné par la découverte de manifestations «superluminiques» observées en mars/avril 1994, durant l'un des nombreux épisodes émissifs qui se produisirent après l'éruption initiale de 1992. On qualifie de superluminique le comportement de certaines sources cosmiques, observées dans le domaine radio, dont les vitesses transverses — perpendiculaires à la ligne de visée — semblent supérieures à la célérité de la lumière. Ce phénomène est le résultat d'une illusion relativiste qui découle d'une application du principe de relativité d'Einstein dans le cas de sites émissifs se déplaçant à des vitesses proches de la célérité de la lumière. S'agissant de GRS 1915+105, les observations V.L.A. du début de 1994 suggèrent que la source éjecta, dans deux directions opposées, deux poches de plasma aptes à rayonner dans le domaine radio. Jusqu'à la fin avril, on a mesuré sur la voûte céleste le déplacement du plasma éjecté du côté de l'observateur, ainsi que celle du plasma éjecté dans la direction opposée. Compte-tenu de la vitesse à laquelle se propage le plasma qui s'approche, et de l'angle sous lequel on observe sa direction de propagation, le plasma donne l'illusion de se mouvoir à une vitesse supérieure à la célérité de la lumière.

La résolution des équations qui régissent les phénomènes superluminiques observés en direction de GRS 1915+105 permet de mesurer la vitesse de propagation des deux poches de plasma éjectées par la source : 0,92 fois la célérité de la lumière, ainsi que l'angle θ que fait la direction de propagation des deux poches de plasma avec la ligne de visée : $\theta = 70^\circ$. Elle fournit également une limite supérieure à la distance de la source : 40 000 années de lumière, ce qui la situe dans le disque de notre propre galaxie. C'est la première fois que l'on observe un phénomène superluminique dans un astre de la Voie lactée, les autres manifestations de ce type furent en effet toutes observées dans des quasars infiniment plus lointains. Ceci ne fait que justifier cette dénomination de microquasar qui semble convenir si bien à certaines sources de rayons gamma suscitées par des trous noirs stellaires accrétants en raison de leurs caractéristiques spectrales. Par la vertu d'observations menées loin du domaine visible, au deux extrémités du spectre électromagnétique, en gamma avec Sigma et en radio avec le V.L.A., on est donc passés en deux ans de la première découverte d'un microquasar à la mise en évidence d'une véritable famille d'objets. En mariant astronomie gamma et radioastronomie, on a ainsi découvert un nouveau type d'astre, inattendu dans la Voie lactée, associant des trous noirs stellaires, identifiés par les rayonnements gamma qu'ils suscitent, et des jets relativistes, mis en évidence par leur émission radio. De prime abord, les microquasars apparaissent comme une curiosité de la nature, combinant sous nos yeux — dans notre propre galaxie — deux des échantillons les plus symptomatiques de la physique relativiste, à savoir les trous noirs et les jets relativistes.

Leur découverte est cependant d'une plus vaste portée : elle met à la disposition des astrophysiciens une série de «laboratoires galactiques» pour mieux comprendre la genèse des jets relativistes. Elle offre également un nouveau moyen pour estimer les distances dans la Galaxie à partir de la résolution des équations relativistes qui régissent les phénomènes superluminiques.

L'Europe avec Integral sur les traces de Sigma

Motivé par l'impressionnante série de résultats scientifiques collectés par Sigma à bord du satellite russe Granat et par les expériences montées à bord de l'observatoire américain à rayons gamma Compton, le comité des programmes scientifiques de l'Agence Spatiale Européenne a sélectionné en juin 1993 la mission Integral (INternational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) parmi les quatre en compétition dans le cadre de la deuxième mission moyenne de Horizon 2000, le programme scientifique à long terme de l'Agence Spatiale Européenne. Sigma ayant démontré l'aptitude des ouvertures codées à produire des images du ciel d'une finesse inégalée dans la bande des rayons gamma de basse énergie, la charge utile du satellite Integral est composée d'appareils dont le principe s'inspire étroitement de celui de Sigma. Les innovations se situent au niveau des détecteurs sensibles à la position qui équiperont les instruments : cette nouvelle génération d'appareils généralisera en effet l'usage des détecteurs semi-conducteurs pour obtenir une meilleure résolution spectrale tout en conservant une bonne résolution angulaire. Ainsi équipé d'instruments directement inspirés de Sigma, le satellite Integral, lancé en 2002, offre à toute la communauté astronomique l'opportunité de poursuivre l'exploration minutieuse du ciel gamma dont Sigma aura eu le privilège de démontrer la faisabilité.