

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par

Sylvain CHATY

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR en SCIENCES de l'UNIVERSITÉ PARIS SUD (XI)

Spécialité: Astrophysique et Techniques Spatiales

**Étude multi-longueur d'onde du microquasar
GRS 1915+105 et de sources binaires de
haute énergie de la Galaxie**

Soutenue le 29 Septembre 1998 devant le jury composé de :

Madame Brigitte ROCCA-VOLMERANGE	Président du jury
Monsieur Christian MOTCH	Rapporteur
Monsieur Josep M. PAREDES	Rapporteur
Monsieur I. Félix MIRABEL	Directeur de thèse
Monsieur Michel BOËR	Examineur
Monsieur Luis F. RODRÍGUEZ	Examineur

Service d'Astrophysique, DSM/DAPNIA/SAP, CEA/Saclay
L'Orme des Merisiers, 91 191 Gif-sur-Yvette, Cedex, France

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Introduction générale	1
1.1.1	Les sources à jets, quasars et microquasars	1
1.1.2	Les trous noirs	6
1.1.3	Microquasars, trous noirs, et sources binaires de haute énergie	8
1.2	Mise au point de la stratégie d'étude	10
1.2.1	Les objets étudiés	10
1.2.2	La démarche: étude multi-longueur d'onde et multi-échelle	10
1.2.3	Le plan de travail	11
1.2.4	Les moyens: télescopes au sol ou dans l'espace	12
1.2.5	La stratégie	12
1.3	Présentation des résultats	13
1.3.1	Description générale	13
1.3.2	Première partie: GRS 1915+105, un microquasar dans notre Galaxie	14
1.3.3	Deuxième partie: Étude de diverses sources de haute énergie	17
1.3.4	Les annexes	19
2	Quasar–Microquasar	21
2.1	Qu'est-ce qu'un quasar?	21
2.2	Qu'est-ce qu'un microquasar?	23
2.3	Pourquoi le terme de microquasar?	25
2.4	Conclusion	30
I	GRS 1915+105: un microquasar dans notre Galaxie	33
3	GRS 1915+105: Un microquasar dans notre Galaxie	35
3.1	Qu'est-ce que GRS 1915+105?	35

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Introduction générale	1
1.2	Mise au point de la stratégie d'étude	10
1.3	Présentation des résultats	13

1.1 Introduction générale

1.1.1 Les sources à jets, quasars et microquasars

Au cours de l'histoire des connaissances en astronomie, le sens d'avancement des découvertes a toujours été caractérisé par un déploiement: les découvertes ont été du proche vers le lointain, de l'unique vers le pluriel, et du petit vers le grand. Ainsi, si la Lune, satellite de la Terre, était connue par les premiers hommes, les satellites qui suivirent furent ceux de Jupiter, découverts par Galilée une nuit de l'hiver 1609-1610, grâce à la petite lunette qu'il venait de construire. Si Herschell avait compris dès le milieu du XIXème siècle que la Voie Lactée était un ensemble d'étoiles auquel nous appartenions, et qu'il devait y avoir beaucoup d'autres de ces «univers-îles» dans l'Univers, il fallut attendre Hubble pour en avoir la confirmation, grâce à sa mesure de la distance de la galaxie d'Andromède. Enfin, si les volcans de la Terre étaient aussi connus par les premiers hommes sur la Terre, –ou du moins par certains–, seul l'envoi de sondes dans le Système solaire a permis d'en révéler l'existence sur d'autres corps, comme par exemple Io, l'un des satellites de Jupiter.

L'explication de ce sens d'avancement des découvertes, –du proche vers le lointain, de l'unique vers le pluriel, et du petit vers le grand–, est limpide: elle est due à la plus grande

visibilité du phénomène le plus proche, et donc par voie de cause à effet, il était nécessaire de posséder les moyens instrumentaux permettant d'observer les phénomènes les plus lointains. Si l'oeil suffisait pour voir la Lune, une lunette était nécessaire à la découverte des satellites de Jupiter; si une lunette suffisait à voir que le nuage de la Voie Lactée représentait les étoiles de notre Galaxie, il fallait un grand télescope pour prouver la nature extragalactique de la nébuleuse d'Andromède, nommée par la suite galaxie d'Andromède; enfin, si l'oeil suffit à voir des volcans sur la Terre, seule une sonde spatiale pouvait les découvrir sur Io.

Pour les découvertes concernant les sources binaires de rayons X à jets relativistes, dont nous allons longuement parler au cours de cette thèse, il en alla tout autrement. En effet, ce sont d'abord les quasars qui ont été découverts, au début des années 1960, en tant qu'objets d'où émanaient des jets, d'une longueur de quelques millions d'années-lumière, constitués de matière voyageant dans l'espace intergalactique à des vitesses relativistes, et émettant un rayonnement radio synchrotron. Le premier quasar découvert, nommé 3C273 car il est le 273^{ème} objet du troisième catalogue de radiosources de Cambridge, est montré en figure 1.1. Les quasars sont des objets des confins de l'Univers, très compacts et énergétiques, dont on pense qu'ils abritent un gigantesque trou noir de plusieurs millions de masses solaires, source de leur grande énergie. Ils absorbent la matière du milieu interstellaire ou des étoiles composant la galaxie qui les héberge. Puis, au sein de ces quasars ont été détectés des mouvements de matière se déplaçant apparemment à une vitesse supérieure à celle de la lumière, et nommés dès lors mouvements superluminiques.

Les microquasars

Il fallut alors attendre une quinzaine d'années, jusqu'à la fin des années 1970, pour découvrir la présence de «microquasars» au sein de notre Galaxie, c'est-à-dire d'objets d'où émanent des jets radio, morphologiquement identiques à ceux des quasars et des galaxies actives, mais de taille évidemment très inférieure, puisque leur longueur n'est ici que de quelques années-lumière. Ces microquasars sont des systèmes binaires de notre Galaxie et des sources d'éjections relativistes, et nous verrons par la suite qu'ils présentent des phénomènes morphologiques et dynamiques analogues aux quasars, mais sur une échelle de longueur des millions de fois inférieure. Le premier objet présentant une analogie de forme avec les quasars est SS 433 (Spencer, 1979). C'est en 1978 qu'il a été compris que les émissions en radio, en optique et dans les rayons X provenaient du même astre (Clark et Murdin, 1978), nommé SS 433 en tant que 433^{ème} objet du catalogue de Stephenson-Sanduleak, regroupant des objets présentant une forte émission en $H\alpha$ (Stephenson et Sanduleak, 1977). Du noyau central de cet objet émanent deux jets visibles dans les longueurs d'onde radio,

la vitesse d'éjection des particules constituant ces jets étant de $0.26 c$ (Milgrom *et al.* , 1982). L'axe de ces jets subit une précession, avec une période de ~ 164 jours (cf (Margon, 1984) pour une revue des propriétés de SS 433).

Cependant, l'analogie entre cet objet et les quasars n'apparaissait pas comme évidente. La première raison à cela est que SS 433 est resté pendant presque une quinzaine d'années le seul objet à présenter des jets émanant du noyau central. Ainsi, il semblait plutôt aux astronomes que SS 433 était un objet aux propriétés étranges, qui ne pouvait pas être classé dans une famille. La deuxième raison expliquant la difficulté de rapprocher SS 433 des quasars, est que la source d'énergie des quasars était attribuée à un trou noir supermassif au centre, alors qu'il était difficile de conclure sur la nature de l'objet compact de SS 433, à savoir s'il s'agissait d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir, en particulier à cause de son spectre très mou dans les hautes énergies. Par la suite, Cygnus X-3 semblait présenter une éjection à une vitesse de $\sim 0.3 c$, mais aucune observation n'avait pu montrer le mouvement des nuages individuels éjectés (Schalinski *et al.* , 1995).

En 1992 survient la découverte de jets émanant d'une source de rayons X proche du centre de notre Galaxie: 1E 1740.7 – 2942 (Mirabel *et al.* , 1992). Ces jets longs d'environ un parsec sont montrés dans la figure 2.1. C'est alors la première fois qu'est mise en avant l'analogie avec les quasars, en donnant le nom de «microquasar» à cet objet. Cette fois-ci, l'analogie avec les quasars est mieux acceptée, en particulier parce que son spectre dans les hautes énergies est dur, et très similaire à celui de Cygnus X-1, le meilleur candidat trou noir. Puis, deux ans après la découverte de ce microquasar, sont observés pour la première fois dans notre Galaxie des mouvements superluminiques, au sein d'une source de haute énergie qui avait été détectée deux ans auparavant: GRS 1915 + 105 (Mirabel et Rodríguez, 1994). Et il est clair que, sans rien enlever à la pertinence et à l'importance de cette découverte, l'existence de ces phénomènes dans les quasars et le lien morphologique entre ces deux classes d'objets, associés à l'hypothèse que cette analogie de forme devait être sous-tendue par une analogie physique, ont accéléré la découverte du même type de phénomènes dans les microquasars. En effet, l'ensemble des outils théoriques était déjà disponible, en particulier grâce à l'ensemble du travail théorique entrepris pour expliquer la présence de jets associés aux quasars, ainsi que la conception, au milieu des années 1970, de mécanismes permettant d'éjecter de la matière dans l'espace sans champ magnétique fort, ce qui est le cas pour un trou noir (par exemple le mécanisme de Blandford-Znajek). Ainsi, l'idée de la présence d'un objet compact, qu'il soit un trou noir ou une étoile à neutrons, entouré par un disque d'accrétion fortement magnétisé, permettant l'éjection collimatée de matière sous forme de nuages de plasma relativistes, était déjà acceptée.

D'ailleurs, la découverte du même type de phénomènes, au sein d'objets très différents

par leur taille et leur masse, a montré que le lien morphologique n'était pas un hasard, mais qu'il était sous-tendu par un lien physique, fondé sur le fait que ces deux classes d'objets tirent leur énergie de la présence d'un objet compact, très certainement un trou noir, entouré d'un disque d'accrétion. Ce fait doit expliquer dans les deux cas la présence de jets perpendiculaires au disque d'accrétion entourant l'objet compact. Cependant, la provenance de la matière constituant le disque d'accrétion, dans le cas du microquasar, n'était pas encore très claire à ce moment-là: s'agissait-il d'une étoile compagnon, d'un nuage moléculaire, ou même d'une association des deux ?

La seule différence entre les quasars et les microquasars devait être la masse de l'objet compact central, supermassif, c'est-à-dire de quelques millions à quelques milliards de masses solaires, dans le cas des quasars, et de masse stellaire, c'est-à-dire de quelques unités à quelques dizaines de masses solaires, dans le cas des microquasars. En effet, la théorie des disques d'accrétion visqueux, comme par exemple le modèle du disque α (Shakura et Sunyaev, 1973), montre que la température effective caractéristique des disques d'accrétion T_{eff} est indépendante des détails des mécanismes de viscosité, et dépend principalement de la masse du trou noir M_X et du taux d'accrétion de matière \dot{M}_{disque} , tandis que la luminosité totale du disque L_{disque} dépend uniquement de \dot{M}_{disque} . Ainsi, (Falcke et Biermann, 1996)

$$\nu_{max} = 0.7 \times 10^{18} \frac{m_{-8}^{1/4} (r^{-3} Q B^{-1} C^{-1/2})^{1/4}}{m_X^{1/2}} \text{ Hz} \quad (1.1)$$

$$T_{eff} = 1.2 \times 10^7 \text{ K} \left(\frac{\nu_{max}}{10^{18} \text{ Hz}} \right) \quad (1.2)$$

et

$$L_{disque} = 3 \times 10^{37} m_{-8} \left(\frac{\eta}{5\%} \right) \text{ erg s}^{-1} \quad (1.3)$$

où $m = M_X / M_\odot$ et $m_{-8} = \dot{M}_{disque} / 10^{-8} (M_\odot / \text{an})$ sont respectivement la masse et le taux d'accrétion du trou noir. $r = R / R_g$ est le rayon sans dimension en unité de rayon gravitationnel égal à la moitié du rayon de Schwarzschild: $r = R_g / 2 = GM / c^2 = 1.48 \times 10^5 M / M_\odot \text{ cm}$. B , C et Q sont des fonctions de r explicitement données (Page et Thorne, 1974). L'efficacité η pour les trous noirs varie entre 5 et 30 %, en fonction de leur moment angulaire.

Ainsi, à cause de cette différence de masse entre les quasars et les microquasars, le disque d'accrétion entourant dans les deux cas l'objet compact n'est pas à la même température. Les quasars constitués d'un trou noir supermassif, et présentant un taux d'accrétion élevé,

montrent une luminosité L_{disque} comprise entre 10^{44} et 10^{48} ergs $^{-1}$, et une température effective T_{eff} entre 10^4 et 10^5 K, alors que les trous noirs de masse stellaire présentent une luminosité L_{disque} dans un intervalle de 10^{36} à 10^{38} ergs $^{-1}$, et une température effective $T_{eff} \sim 10^7$ K. De ce fait, la relation 1.2 montre que le disque d'accrétion du quasar émet plutôt dans l'ultra-violet et l'optique, alors que celui du microquasar émet plutôt dans les rayons X. Ainsi, les quasars pouvaient être par nature plus facilement détectés dans les longueurs d'onde optiques ou ultraviolettes, alors que les microquasars l'étaient plus facilement dans les rayons X, ou plus généralement dans les hautes énergies. Comme les observations dans les hautes énergies nécessitaient d'être effectuées obligatoirement, soit sur des ballons, soit dans des satellites, à cause de l'atmosphère terrestre qui arrête les rayonnements de haute énergie, cela explique que les quasars aient été découverts plus rapidement que les microquasars. De plus, les quasars sont de très fortes sources radio, plus fortes que les microquasars, et les instruments radio au sol ont été développés plus vite que les instruments de haute énergie, X et γ , comme SIGMA par exemple.

Inversion de sens d'avancement de la sphère des connaissances

Ainsi, si l'avancement des connaissances s'est fait dans ce sens, des quasars vers les microquasars, c'est-à-dire du lointain vers le proche, du grand vers le petit, et en définitive du pluriel vers l'unique, cela est dû à la différence de la nature des deux objets, qui ne sont pas a priori détectés avec les mêmes instruments. L'observation de ces deux types d'objets différents est donc contrainte par le développement technologique de l'instrumentation observationnelle.

Même ce nom de microquasar, s'appliquant à ce type d'objets, provient des quasars, comme si les microquasars n'étaient pas des objets à part entière leur permettant d'acquérir un nom, mais n'existant que par comparaison avec d'autres objets. Mais il faut tout de même remarquer qu'il existe d'autres noms les désignant, comme par exemple «source binaire de rayons X à jets radio»¹. De plus, certains microquasars appartiennent à la famille des sources binaires de rayons X à trou noir².

Finalement, comme dans le cas des microquasars l'avancement des connaissances est parti des quasars, il s'est produit un changement de sens de la sphère d'avancement des connaissances: au lieu de se déployer, elle s'est contractée, en passant du lointain au proche, et du grand au petit.

Au cours de cette thèse, je vais relater les résultats de nos recherches concernant ces

1. en anglais Radio-Jet X-Ray Binary (RJXRB)

2. en anglais Black Hole X-Ray Binary (BHXRb)

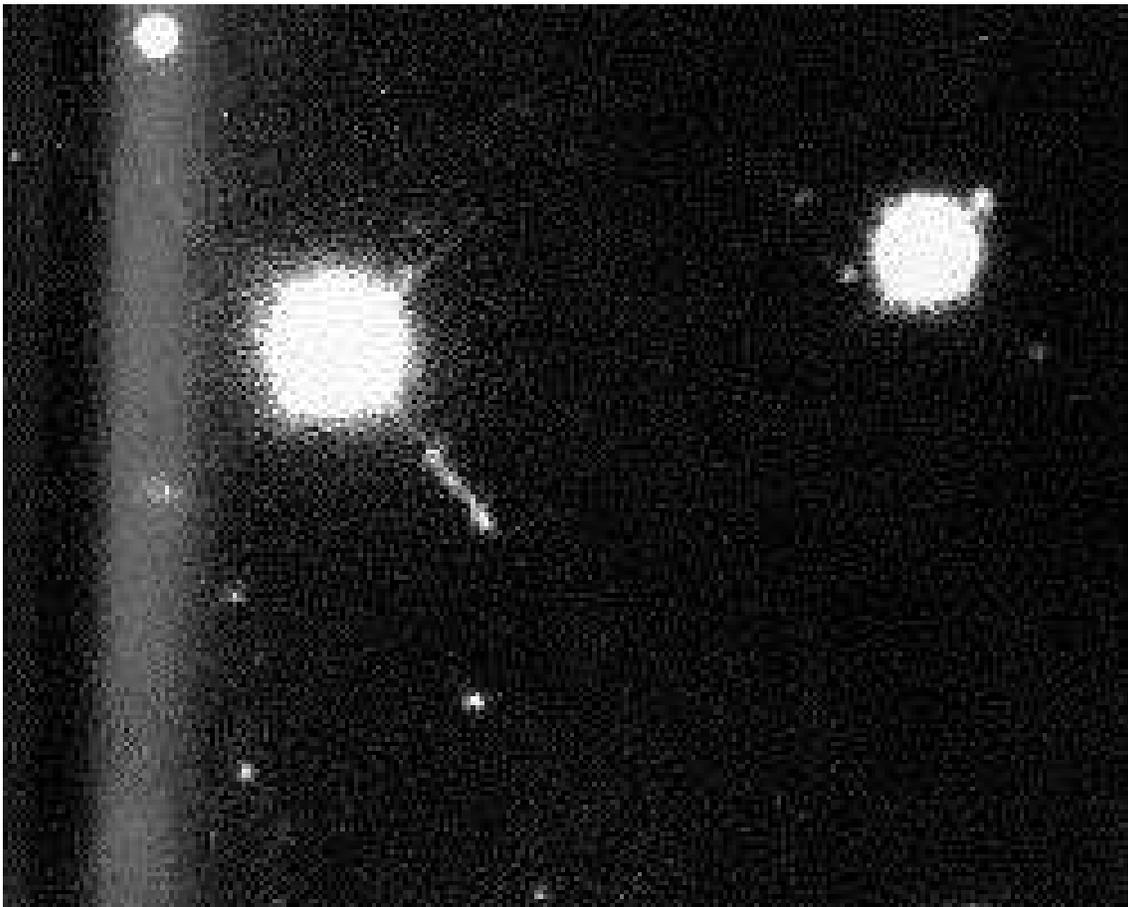


FIG. 1.1 – *Premier quasar découvert: 3C273.*

objets que sont les microquasars. En particulier, je vais montrer que nous avons, au moyen d'études dans plusieurs longueurs d'onde, réussi à cerner le modèle aujourd'hui communément admis du microquasar. Un microquasar est ainsi un trou noir de quelques masses solaires, entouré d'un disque d'accrétion d'une température de quelques 10^6 K, attirant la matière d'une étoile compagne se trouvant à ses côtés, et éjectant de la matière sous forme de nuages de plasma relativistes, le long de jets s'étalant sur quelques années-lumières.

1.1.2 Les trous noirs

Dans la lignée des grandes explorations intellectuelles conduites par l'Homme, repoussant les limites de son entendement, celle de la quête des étoiles effondrées, et en particulier du «Trou Noir», rassemble tous les ingrédients de ses questionnements. Depuis la mort de l'astre lors de son effondrement sur lui-même, en passant par son appétit vorace le faisant

dévorant son étoile compagnon, ou plusieurs étoiles, ou encore d'autres matières, jusqu'à son égocentrisme et sa fermeture au monde extérieur, le temps et l'espace du trou noir se refermant sur lui-même derrière son horizon, cet objet ébranle et transcende les questionnements humains.

Or la nature même de cet astre, au formidable pouvoir attracteur créé par son potentiel gravitationnel, nous cache son existence. Du moins tant qu'il reste isolé. Car si le trou noir s'associe à une étoile, il en attire alors forcément de la matière, et devient dès lors visible, car certains signes ne trompent pas. Ainsi, c'est lorsque le trou noir retrouve sa vraie nature d'attracteur, en se découvrant et en sortant de son isolement, qu'il ne peut plus cacher son existence au monde extérieur.

D'ailleurs, dès que les astronomes pensent avoir détecté un trou noir, ils ne le nomment pas «trou noir», mais «candidat trou noir». Ce terme est là pour rappeler que même si la masse d'un objet invisible est supérieure à $3 M_{\odot}$, nous ne pouvons pas être totalement sûrs qu'il s'agisse d'un trou noir. Il peut en effet peut-être exister des corps invisibles dont la masse est supérieure à $3 M_{\odot}$, mais dont la nature nous est inconnue. Pour montrer leurs incertitudes et en même temps prévoir toute éventualité, les astronomes ont ainsi donné à ces objets le nom de «candidat trou noir», signifiant que, pour l'instant, nous ne pouvons pas acquiescer la certitude absolue que tel corps est un trou noir. Il faudra sûrement attendre le développement de l'astronomie des ondes gravitationnelles pour avoir la preuve directe de l'existence des trous noirs. En attendant, certains indices, tout en n'étant que des preuves indirectes liées à l'action de ces corps sur leur environnement, suggèrent leur existence.

Cette appellation de candidat trou noir montre la prudence des astronomes vis-à-vis de ces corps, et cette prudence au cours des découvertes de ces dernières décennies s'est révélée judicieuse, car nombre d'objets se sont hissés au rang de candidats trous noirs, pour ensuite se voir refuser cette appellation, en exhibant des signes caractéristiques des étoiles à neutrons.

En effet, la seule preuve de l'existence d'un trou noir, ou plutôt d'un candidat trou noir, est la détermination de sa masse, à partir d'études dynamiques de l'étoile compagnon, en particulier fournies par des observations spectroscopiques effectuées dans les longueurs d'onde optiques. Cependant, ceci est impossible à faire pour certains objets, par exemple s'ils sont justement invisibles en optique. Il faut alors faire preuve d'imagination, pour réussir à discerner les trous noirs des étoiles à neutrons. Un bon moyen de discernement est le comportement de ces objets aux hautes énergies. Soit un système A, constitué d'un objet compact et d'une étoile compagnon. Supposons que la masse de l'objet compact est connue par d'autres moyens et le place au rang de candidat trou noir. Soit maintenant un

système B, constitué lui aussi d'un objet compact et d'une étoile compagnon. Supposons que ce système B présente dans les hautes énergies un comportement très similaire au système A. Nous pouvons alors en déduire que l'objet compact de B est sûrement aussi un candidat trou noir. Les meilleurs candidats trous noirs, c'est-à-dire ceux dont la masse M_X , déterminée à partir d'études dynamiques de l'étoile secondaire, est supérieure à la masse maximale (canonique) pour une étoile à neutrons de $3.2 M_\odot$, sont Cygnus X-1 ($M_X \sim 16 \pm 5 M_\odot$), LMC X-3 ($M_X \geq 7 M_\odot$), LMC X-1 ($M_X \sim 6 M_\odot$), A0620-00 ($M_X \geq 7.3 M_\odot$), V404Cyg ($M_X \sim 8 - 12 M_\odot$), Nova Muscae 1991 ($M_X \geq 3.1 M_\odot$), et récemment GRO J1655-40 ($M_X \sim 7.02 \pm 0.22 M_\odot$), où M_X représente la masse de l'objet compact, c'est-à-dire ici du trou noir.

Au cours de la description de mes travaux, relatée dans cette thèse, je vais montrer que nous avons réussi à cerner des phénomènes se produisant très près de l'horizon d'un candidat trou noir. Nous avons en effet observé que de la matière provenant de la partie interne du disque d'accrétion disparaît au-delà de la dernière orbite stable entourant le trou noir. Par la suite, nous avons observé les signatures de nuages de plasma relativistes éjectés de l'objet compact. L'ensemble de ces phénomènes a permis de mettre en évidence la présence de l'horizon du trou noir, unique moyen de prouver l'existence de cet objet, et de montrer le lien entre l'accrétion et l'éjection de matière autour d'un objet compact, qu'il soit un trou noir ou une étoile à neutrons.

1.1.3 Microquasars, trous noirs, et sources binaires de haute énergie

Parce que les liens entre tous ces objets, les microquasars, les trous noirs, et l'ensemble des sources binaires de haute énergie, sont encore enchevêtrés et mal connus, il était nécessaire d'étudier un panel représentatif de ces objets. En effet, les questions qui se posent actuellement dans ce domaine sont multiples. La première tient à la nature même des microquasars. L'objet compact est-il un trou noir ou une étoile à neutrons ?

Les questions suivantes ont trait aux mécanismes présents dans ces objets. En effet, si la source d'énergie est bien identifiée, puisqu'elle est créée par le potentiel gravitationnel de l'objet compact, qui est bien sûr plus intense dans le cas du trou noir, les mécanismes existant au sein de ces objets, et tirant profit de cette formidable énergie disponible, restent, eux, encore mal compris.

Les questions surgissent dès lors que l'on s'intéresse aux flots d'accrétion autour de l'objet compact, et aux éjections de matière. D'ailleurs, le comportement du flot d'accrétion peut représenter la clé de l'énigme concernant la nature de ces objets. En effet, si l'objet

compact est une étoile à neutrons, la matière accrétée entrant en contact avec la surface de l'étoile sera en mesure de déclencher une série de phénomènes observables. Inversement, si l'objet compact est un trou noir, cette même matière accrétée n'émettra plus de rayonnement à partir du moment où elle aura traversé l'horizon de Schwarzschild. De plus, le mécanisme conduisant à l'éjection de nuages de plasma à des vitesses relativistes suscite toujours des questions. Puis surviennent les questions liées à la nature de la matière éjectée. Cette matière est-elle uniquement constituée d'électrons, ou d'électrons et de positons, ou encore est-elle aussi baryonique ?

La question découlant des précédentes concerne la possibilité de l'existence d'un lien entre la matière accrétée et la matière éjectée. Est-ce que ces deux phénomènes –accrétion et éjection– sont reliés de quelque façon, ou est-ce qu'ils sont complètement dissociés ? Et si ces deux phénomènes sont reliés, est-ce qu'ils constituent une caractéristique des microquasars ? Ces phénomènes d'accrétion–éjection peuvent-ils se produire sur une longue échelle de temps ? Ou, autrement dit, quelle est la durée de vie des microquasars ?

Enfin, quelle est la différence fondamentale entre les sources binaires de haute énergie hébergeant des candidats trous noirs et ne présentant pas de jet, et les microquasars ? Autrement dit, existe-t-il dans notre Galaxie des «microblazars», comme il existe dans l'Univers extragalactique des blazars, galaxies actives sources d'émission forte en radio mais ne présentant pas de jets, car ceux-ci seraient alignés avec la ligne de visée, et nous serions donc, uniquement à cause de la géométrie de ces objets, dans l'impossibilité de détecter des jets émanant de ces objets.

Cette étude des microquasars dépasse même le cadre de ces objets, puisqu'elle permet d'aller plus loin dans la compréhension de l'ensemble des sources à jets. En effet, dévoiler le «fonctionnement» des microquasars, en particulier par la mise en évidence d'un lien probable entre l'accrétion et l'éjection de matière, facilite la compréhension de l'ensemble des objets accrétant de la matière, dont l'objet compact est soit un trou noir, une étoile à neutrons, une naine blanche ou même une étoile jeune. Ainsi, si les jets visibles de part et d'autre de ces objets sont réellement créés par l'accrétion de matière autour de l'objet compact, ou encore par une augmentation temporaire de ce taux d'accrétion, l'observation de la matière éjectée doit fournir des informations sur la nature de l'objet compact.

des images infrarouges, ainsi qu'une annexe regroupant les différents articles auxquels ont donné lieu ces travaux de thèse, et joints dans cette thèse.

Chapitre 2

Quasar–Microquasar

Sommaire

2.1	Qu'est-ce qu'un quasar?	21
2.2	Qu'est-ce qu'un microquasar?	23
2.3	Pourquoi le terme de microquasar?	25
2.4	Conclusion	30

2.1 Qu'est-ce qu'un quasar?

Les quasars sont des objets de l'Univers qui ont été découverts il y a plus de trente-cinq années. A cette époque, les quasars étaient détectés comme des sources radio puissantes, mais l'émission de ces objets provenait d'une région très petite. Par exemple, la radio-source 3C 48 présentait un diamètre apparent inférieur à une seconde d'arc. Dès qu'une boîte d'erreur¹ suffisamment précise, de seulement 5 secondes d'arc, fut fournie, des observations optiques permirent de détecter la contrepartie optique de cette radiosource. Cette contrepartie, un point lumineux isolé, de couleur bleue, ne ressemblait en rien à une galaxie –ce qui surprit énormément les astronomes de cette époque–, mais semblait être une étoile. Cependant, la surprise augmenta lorsque les astronomes prirent des spectres sur cet objet: ils s'aperçurent en effet que ceux-ci présentaient des raies d'émission dont les longueurs d'onde étaient très différentes de toutes celles qu'ils avaient vues jusqu'ici, que ce soit dans les gaz chauds fabriqués sur Terre, ou au sein des étoiles. Et c'est en 1963 que Maarten Schmidt comprit, en examinant le spectre de 3C 273, que si les raies présentaient

1. Précision de localisation d'une source, donnée par les capacités de l'instrument

des longueurs différentes, c'était uniquement parce que celles-ci étaient décalées vers le rouge, c'est-à-dire vers les grandes longueurs d'onde. Ce décalage étant proportionnel à la vitesse d'éloignement de l'objet observé, celui-ci devait s'éloigner très rapidement de nous. Or, l'univers étant en expansion, ce sont les objets les plus lointains qui ont la plus grande vitesse d'éloignement. Ainsi, le décalage vers le rouge des raies observées imposait que ces objets soient situés très loin de nous, à des distances dites cosmologiques. Et pourtant, malgré leur grande distance, nous recevions énormément d'énergie en provenance de ces objets.

Ainsi, parce que ces objets ressemblaient à des étoiles dans le domaine optique, bien qu'émettant un fort rayonnement radio et présentant des raies étranges, les astronomes leur ont donné le terme de «quasar», résultant de la contraction des mots anglais «QUAsi Stellar Astronomical Radiosource»². Il s'est révélé par la suite –les développements de l'astronomie observationnelle aidant– que ces quasars n'étaient en réalité pas des objets ponctuels, ni dans le domaine des ondes radio, ni dans celui de l'optique. Cependant, nous verrons dans la suite que la région centrale est tellement brillante qu'elle empêche de distinguer le reste de l'objet. Bien que la luminosité de ces objets soit très grande, supérieure à la luminosité des galaxies ordinaires, comme par exemple la Voie Lactée, la région émettrice de la majorité du rayonnement est très petite, généralement inférieure à la taille du système solaire. La taille de cette région a été déduite à partir de l'échelle de temps des variations détectées au sein des noyaux actifs de galaxie, parfois de l'ordre d'une journée, ce qui impliquait que la taille de la source d'énergie fût inférieure à un jour-lumière. En effet, les astronomes estiment que si une variation est détectée au sein d'un objet, cette variation doit être due à un changement d'état de l'ensemble de l'objet. Or, comme rien ne peut voyager plus vite que la lumière, cela signifie qu'une variation de l'état d'un objet au cours d'un certain intervalle de temps impose que cet objet ait une taille inférieure à la distance parcourue par la lumière pendant ce laps de temps. Les quasars représentent donc une débauche d'énergie provenant d'une région très petite.

Aujourd'hui, après plus de trente-cinq années d'études observationnelles et théoriques, les quasars restent des objets encore très mystérieux. Les traits principaux de la physique des quasars semblant être quasiment les mêmes que dans les radiosources extragalactiques et les noyaux actifs de galaxies, nous allons maintenant résumer le modèle aujourd'hui communément admis pour expliquer l'émission de ce type d'objets, en utilisant comme terme générique le mot «quasar».

L'explication habituellement acceptée, est que les quasars sont des galaxies très loin-

2. Source radio astronomique quasi stellaire

taines, au centre desquelles est localisé un trou noir supermassif, de quelques millions jusqu'à quelques milliards de masses solaires. Autour de ce trou noir en rotation, existe un disque d'accrétion³, d'une taille d'environ un milliard de kilomètres. Ce disque d'accrétion est chauffé par dissipation visqueuse, à une température thermique moyenne de quelques milliers de Kelvin. Il émet ainsi la majeure partie de son rayonnement dans les longueurs d'onde ultraviolettes et optiques. Ce disque d'accrétion aurait puisé la matière qui le constitue, soit à partir du milieu interstellaire de la galaxie hôte qui héberge le trou noir, soit encore à partir d'étoiles disloquées par les effets de marée produits par le trou noir. De part et d'autre du centre du trou noir, et perpendiculairement au disque d'accrétion ceinturant le trou noir, émanent des jets collimatés de gaz de particules relativistes, sur des distances de quelques millions d'années-lumière. Ce modèle est représenté dans la partie droite de la figure 2.4. Ces nuages de gaz émettent un rayonnement radio synchrotron, et sont éjectés à des vitesses qui, lorsqu'elles sont mesurées sur le plan du ciel, apparaissent être supérieures à celle de la lumière. L'énergie de rotation du trou noir semble donc être utilisée et transformée pour permettre l'éjection focalisée de plasma magnétisé à des vitesses relativistes.

Les incertitudes majeures subsistant à propos de ces quasars résident dans la nature de la source d'énergie, ainsi que dans celle de la matière éjectée à des vitesses superluminiques. Cependant, les réponses à ces questions ne peuvent pas être fournies simplement, le problème majeur de l'étude de ces objets étant leur grand éloignement. De plus, à cause de la grande masse de ces objets, l'échelle de temps des variations liées aux cycles d'accrétion et d'éjection de matière, tels que celles que nous avons observés au sein de GRS 1915 + 105, et que nous allons amplement expliciter par la suite, est de l'ordre de quelques milliers d'années. Ainsi, les astronomes ne peuvent pas s'attendre à déceler au sein de ces objets des variations significatives, dues aux transferts entre matière accrétée et matière éjectée, au cours d'une vie humaine. J'expliquerai plus en détail l'échelle de temps de ces variations dans le paragraphe 2.3.

2.2 Qu'est-ce qu'un microquasar?

«Microquasar» est le terme générique d'objets dont je vais maintenant décrire les caractéristiques principales. Le premier microquasar, 1E 1740.7 – 2942, a été découvert il y a seulement cinq ans, il est montré dans la figure 2.1 (Mirabel *et al.*, 1992). Il faut cependant remarquer que la distance de cet objet n'est pas encore déterminée avec certitude. Il fut le

3. Disque entourant un objet, et constitué de matière arrachée à un élément extérieur

premier spécimen d'une famille qui allait par la suite rapidement s'agrandir, bien qu'elle reste encore aujourd'hui assez restreinte, en même temps que ses membres étaient intensément étudiés. Les différents microquasars connus à l'heure actuelle sont rapportés dans le tableau 2.1. Une revue des différents aspects à plusieurs longueurs d'onde des binaires de rayons X émettant un jet radio est effectuée par (Fender *et al.*, 1997a). Leurs jets, émanant de part et d'autre de l'objet central, les font ressembler aux quasars, mais comme ils se trouvent dans notre Galaxie, ils s'étendent sur des distances bien inférieures à celles atteintes par les jets des quasars. Pour cette raison, ces objets ont été appelés «microquasars». Le fait qu'ils se trouvent relativement proches de nous, localisés dans notre propre Galaxie, la Voie Lactée, facilite grandement leur étude.

L'analogie morphologique existant entre les quasars et les microquasars a permis d'accélérer fortement les découvertes observationnelles concernant les microquasars. En effet, si cette analogie morphologique ne devait pas être due au hasard, mais bien plutôt au fait que les microquasars étaient certainement les analogues des quasars du point de vue de la dynamique et de la physique, mais à des échelles de masse et de distance bien inférieures. La première conséquence de la prise en compte de cette analogie fut la découverte de mouvements apparemment superluminiques, au sein d'objets de notre Galaxie. En effet, si des mouvements apparemment superluminiques existaient dans des jets créés par les quasars, il devait aussi être possible d'en détecter dans les jets créés par les microquasars. La première observation de ces mouvements superluminiques dans la Voie Lactée fut effectuée deux ans après la découverte du premier microquasar, et ce dans un autre microquasar, GRS 1915 + 105. Cette observation est montrée dans la figure 2.2 (Mirabel et Rodríguez, 1994). Cette découverte a permis d'établir clairement le mouvement relativiste des sources de rayonnement.

Actuellement, le modèle communément accepté (Mirabel et Rodríguez, 1998) présente les microquasars comme des systèmes binaires, dont l'un des constituants est un trou noir en rotation, de masse stellaire, c'est-à-dire de quelques unités à quelques dizaines de masses solaires, et l'autre est une étoile. Autour du trou noir tourne un disque d'accrétion, d'une taille d'environ 1 000 km, chauffé par dissipation visqueuse à une température thermique moyenne de quelques millions de degrés Kelvin. Ce disque d'accrétion émet ainsi dans le rayonnement X. La matière composant le disque d'accrétion provient de l'étoile compagnon du trou noir. Émanant de part et d'autre du centre du trou noir, des jets collimatés de gaz de particules relativistes s'étendent sur quelques années-lumière. Les nuages éjectés émettent un rayonnement radio synchrotron⁴, et se déplacent sur le plan du ciel à des

4. Rayonnement émis par des particules se déplaçant à des vitesses relativistes

Source	Émission X	Objet effondré	$V_{\text{éjection}}$	Jets	Références
GRS 1915 + 105	Transitoire	Trou noir	0.92 c	60 pc	mir94
GRO J1655 – 40	Transitoire	Trou noir	0.92 c		hje95
Cygnus X-3	Persistante	Étoile à neutron?	0.3 c		sch95
SS 433	Persistante	Étoile à neutron?	0.26 c	60 pc	spe79
1E 1740.7 – 2942	Persistante	Trou noir		1 pc	mir92
GRS 1758 – 258	Persistante	Trou noir		2 pc	rod92
Circinus X-1	Persistante	Étoile à neutron		4 pc	ste93

TAB. 2.1 – Sources de jets relativistes de la Galaxie.

hje95: (Hjellming et Rupen, 1995)

mir92: (Mirabel, 1992)

mir94: (Mirabel et Rodríguez, 1994)

rod92: (Rodríguez et al. , 1992)

sch95: (Schalinski et al. , 1995)

spe79: (Spencer, 1979)

ste93: (Stewart et al. , 1993)

vitesse mesurées comme étant apparemment superluminiques. L'énergie de rotation du trou noir semble encore une fois mise à contribution, pour permettre l'éjection collimatée du plasma magnétisé, à des vitesses relativistes. Le schéma typique d'un microquasar est représenté en figure 2.3. Dans ces objets, compte tenu de leur relative petite masse, l'échelle de temps des variations à laquelle nous pouvons nous attendre, quant aux variations liées aux cycles d'accrétion et d'éjection de matière, est de l'ordre de la minute, ce qui est tout à fait accessible à l'observation liée à une échelle humaine de temps. Je reviendrai sur l'échelle de temps de ces variations dans le paragraphe 2.3.

2.3 Pourquoi le terme de microquasar ?

D'un côté de l'échelle, des quasars, au centre des galaxies lointaines, représentent un trou noir d'une masse de 10^6 à $10^9 M_{\odot}$ ⁵, des jets sur une longueur de plusieurs 10^6 années-lumière, et des variations temporelles typiques dues aux cycles d'accrétion et d'éjection

5. M_{\odot} signifie 1 masse solaire, soit 1.99×10^{30} kg

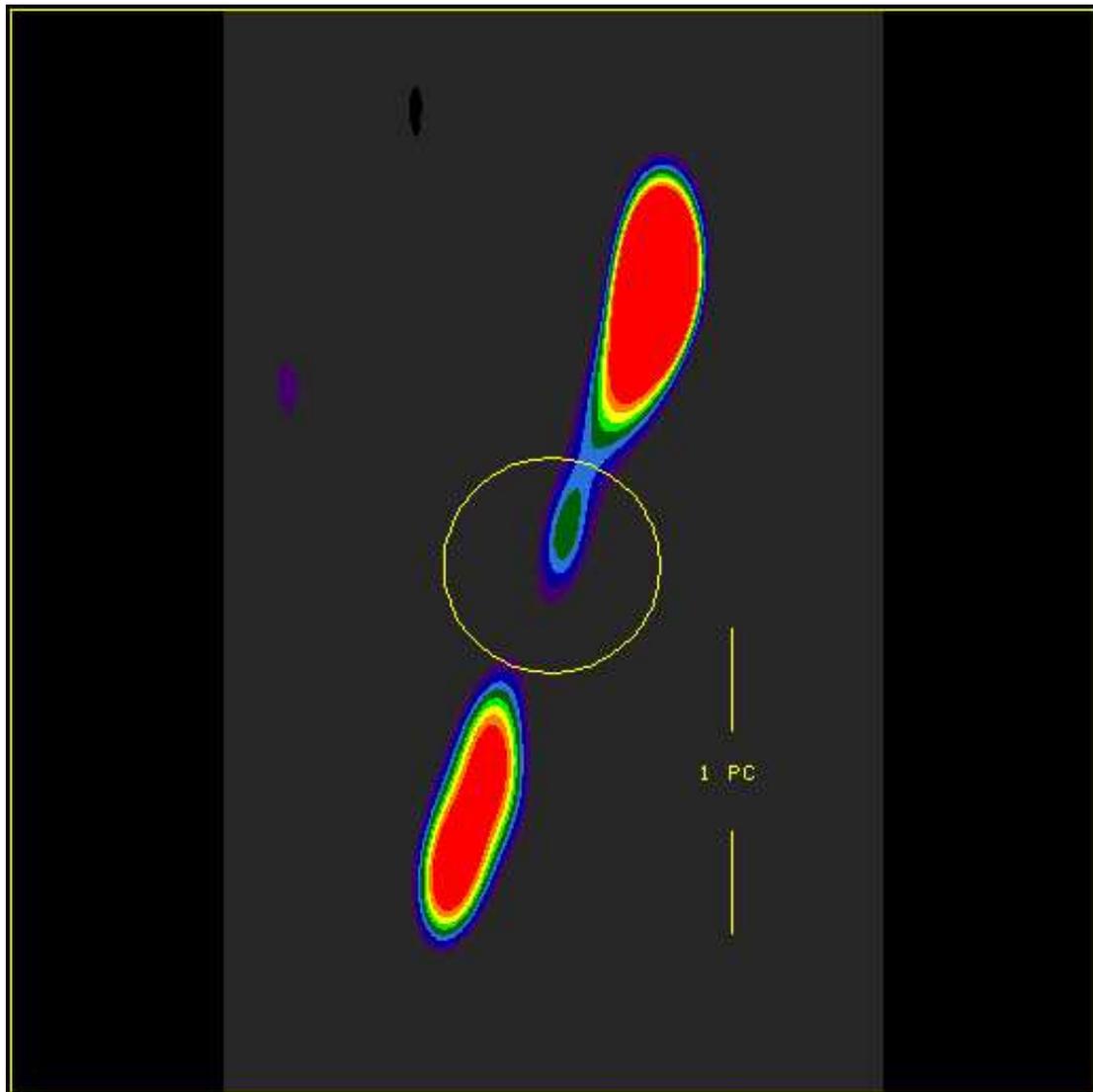


FIG. 2.1 – Carte radio du premier microquasar découvert près du centre galactique, effectuée avec le radiotélescope du VLA (Very Large Array), à la longueur d’onde de 20 cm. Ce microquasar est la source de haute énergie nommée 1E 1740.7 – 2942. Deux jets radio sont visibles, fortement collimatés sur une distance de quelques années-lumière, selon une structure similaire à celle des quasars (Mirabel et al. , 1992).

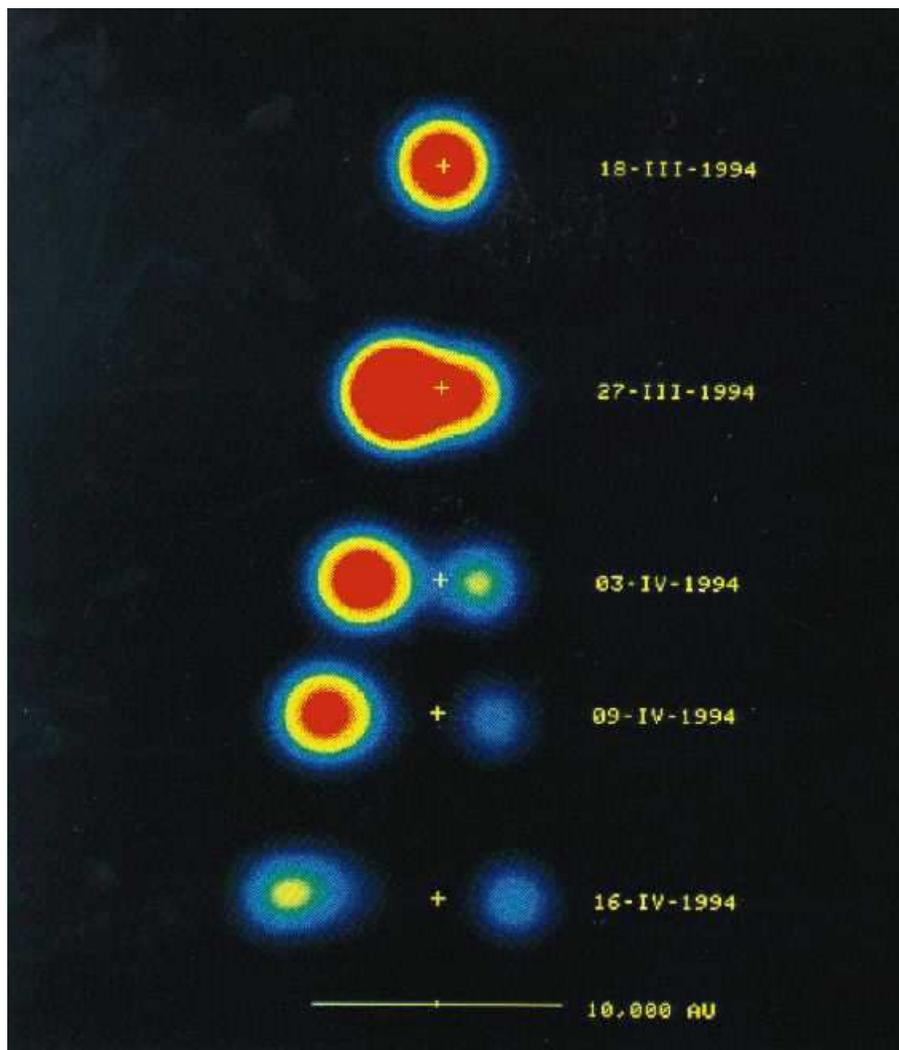


FIG. 2.2 – Découverte du premier mouvement superluminaire observé dans la Voie Lactée, au sein du microquasar GRS 1915 + 105. Il s'agit d'une séquence de cartes radio obtenues grâce au radiotélescope du VLA à la longueur d'onde de 3.5 cm, montrant des condensations de nuages de plasma relativistes éjectées par l'objet central à une vitesse apparente de $1.25c$, en fait égale à 92% de celle de la lumière (Mirabel et Rodríguez, 1994).

de matière, tels que ceux que nous verrons dans GRS 1915 + 105, de l'ordre de quelques 10^3 ans. De l'autre côté de l'échelle, les microquasars, des systèmes binaires au sein de notre propre galaxie, représentent un trou noir d'une masse de quelques unités à quelques dizaines de masses solaires, des jets sur une longueur de plusieurs années-lumière, et des variations temporelles typiques dues aux cycles d'accrétion et d'éjection de matière de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes, dans les rayonnements radio, infrarouge

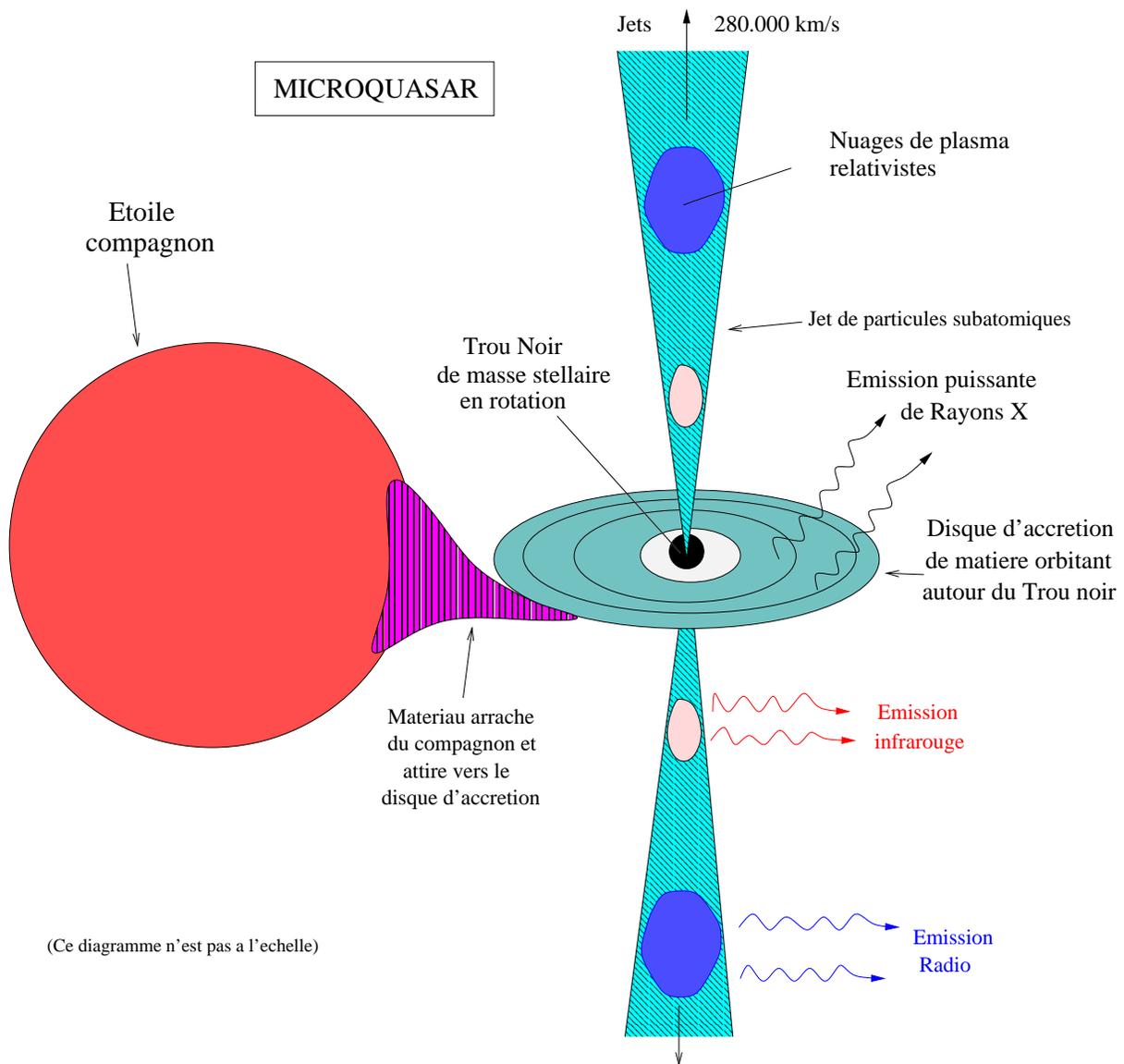


FIG. 2.3 – Schéma illustrant le modèle d'un microquasar typique.

et X.

Explicitons le fait que les mêmes phénomènes, liés aux cycles d'accrétion et d'éjection de matière, se produisant en quelques minutes autour des trous noirs de quelques masses solaires au sein des microquasars, nécessiteront plusieurs milliers d'années autour de trous noirs de quelques milliards de masses solaires, dans les quasars les plus massifs. Les particules gravitant autour de ces corps réussissent à résister à l'attraction gravitationnelle en l'équilibrant grâce à leur énergie cinétique. Le rayon limite auquel ces particules peuvent encore résister à l'attraction gravitationnelle, sans tomber inéluctablement vers

la singularité, est de l'ordre de quelques rayons de Schwarzschild, la valeur de ce rayon étant $r_g = \frac{2GM}{c^2}$. Comme $r_g \propto M$, la taille de l'objet est proportionnelle à sa masse. Le temps caractéristique des phénomènes se produisant très près de la dernière orbite stable ⁶ autour du trou noir étant donné par $\tau \sim \frac{r_g}{c}$, on obtient $\tau \sim M$. Ainsi, le temps dynamique caractéristique des variations autour d'un trou noir est proportionnel à sa masse. Si un trou noir de quelques masses solaires présente des variations liées aux cycles d'accrétion et d'éjection de matière sur une durée d'une minute, un trou noir de quelques milliards de masses solaires présentera les mêmes variations liées aux mêmes cycles sur une échelle de quelques milliers d'années.

Au vu de ce qui a été exposé dans les paragraphes précédents, les deux classes d'objets désignées par les termes «quasar» et «microquasar» présentent des échelles de longueur, de masse et de temps dynamique respectives très différentes. Plus précisément, les échelles de longueur et de temps dynamiques caractéristiques des phénomènes sont proportionnelles à la masse du trou noir. Cependant, la physique régissant les phénomènes qui se produisent au sein de ces deux classes d'objets semble être fondamentalement la même, puisqu'il s'agit de la physique des flots d'accrétion de matière, autour d'un trou noir, ainsi que de la physique de la formation de jets à côté de l'horizon d'un trou noir. Plus généralement, il s'agit même de la formation de jets relativistes, n'importe où dans l'Univers.

Il existe donc une double analogie entre ces deux classes d'objets: **morphologique et physique**. D'une part, l'analogie est morphologique, puisque les deux objets sont constitués d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion, d'où émanent des jets relativistes. Cette analogie est illustrée en figure 2.4. D'autre part, l'analogie est physique, puisque la même physique semble régir ces objets. Autrement dit, l'astrophysique des trous noirs est identique indépendamment de la masse de l'objet concerné, seules les échelles de variation temporelle et de longueur sont proportionnelles à la masse du trou noir (Rees, 1998). C'est en cela que le terme de «microquasar» est adapté aux systèmes binaires de la galaxie, abritant un trou noir dans l'environnement duquel sont éjectés des jets.

Cependant, il faut remarquer que si les microquasars avaient été détectés avant les

6. La dernière orbite circulaire stable, autour d'un trou noir, est telle qu'il n'existe pas d'orbite circulaire de rayon inférieur à celui de la dernière orbite stable, car les particules spiralent rapidement vers $r = 0$. Cette dernière orbite stable est située à un rayon de $3r_g$, où r_g est le rayon de Schwarzschild, dans le cas d'un trou noir sans rotation (trou noir de Schwarzschild). Dans le cas de trous noirs en rotation (trous noirs de Kerr), la valeur de la dernière orbite stable dépend du sens de rotation de la particule, par rapport au sens de rotation du trou noir. Si les deux tournent dans le même sens, il s'agit de corotation, alors que si les deux tournent dans le sens opposé, il s'agit de contre-rotation. Autour de trous noirs en rotation à la vitesse maximale, la dernière orbite stable est située à $\frac{r_g}{2}$ pour des particules test en corotation, et à $\frac{9}{2}r_g$ pour des particules tes en contre-rotation (Shapiro et Teukolsky, 1983).

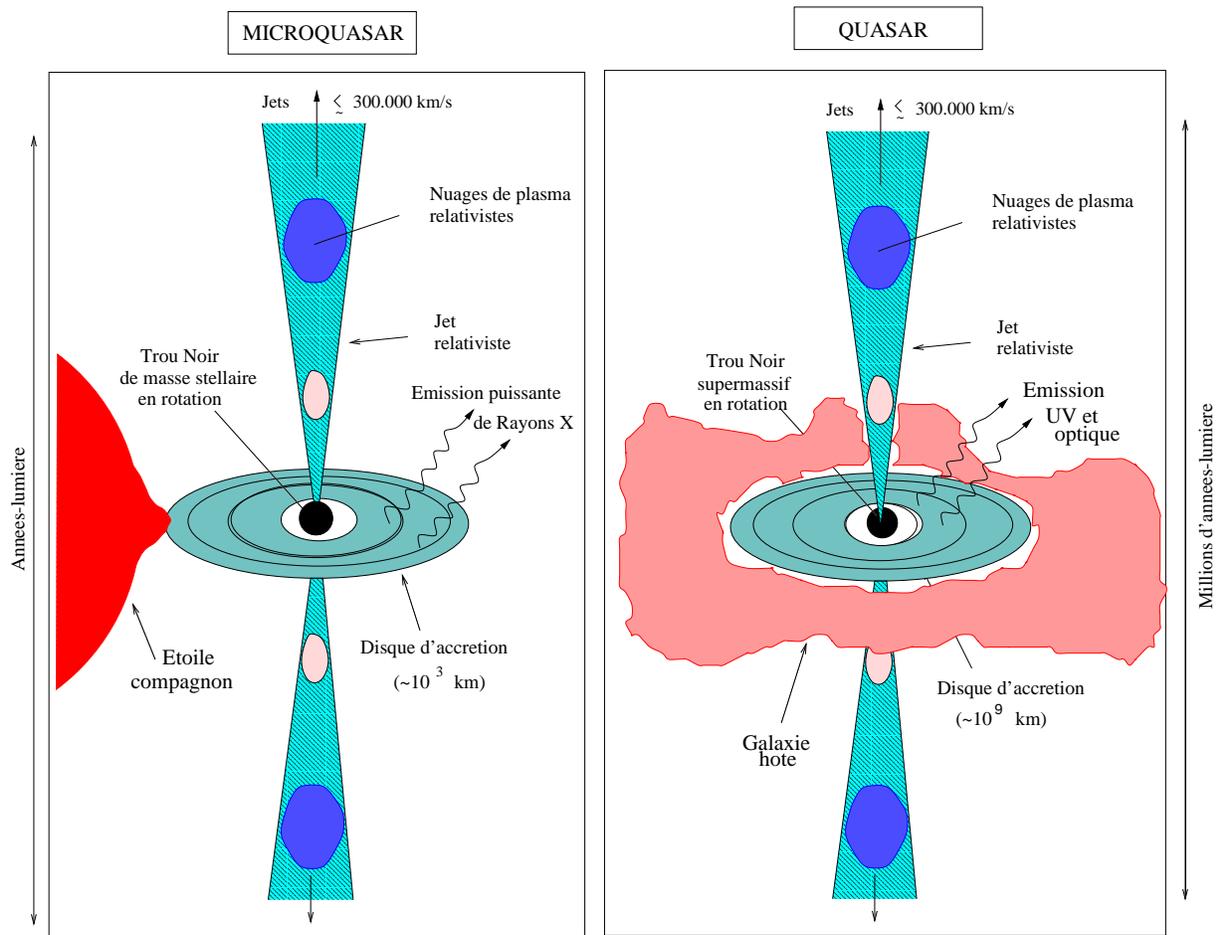


FIG. 2.4 – Schémas typiques illustrant les analogies entre les quasars et les microquasars

quasars, les astronomes auraient certainement donné le nom de «quasars» aux actuels microquasars, en tant que source radio quasi-stellaire. Alors, peut-être que les actuels quasars auraient été baptisés «macro- ou méga-quasars», en tant qu'objets dont la physique les caractérisant est analogue aux «quasars», mais sur une échelle spatiale un million de fois supérieure. Cette inversion de terme est d'après moi due au changement de sens de la sphère d'avancement des connaissances, dont j'ai parlé dans le paragraphe 1.1.1.

2.4 Conclusion

L'une des grandes questions actuelles de l'astrophysique des hautes énergies étant la connexion entre le flot de matière approchant la dernière orbite stable d'un trou noir, et la genèse de jets relativistes, c'est très certainement en ayant accès à la dynamique

des phénomènes au sein des microquasars, c'est-à-dire en ayant la possibilité d'observer des variations dynamiques, qu'il sera par la suite plus aisé de faire le lien entre tous les phénomènes visibles.

Cette étude nécessite un ensemble d'observations, souvent simultanées, grâce à plusieurs longueurs d'onde, des rayons X aux ondes radio, ainsi que je l'ai décrit dans le paragraphe 1.2.2. En effet, pour comprendre le lien entre tous les phénomènes se produisant dans ce type d'objets, il faut avoir accès au déroulement de l'ensemble des phénomènes, chacun d'eux étant visible à des longueurs d'onde différentes. Par exemple, à partir de notre étude de GRS 1915 + 105 à plusieurs longueurs d'onde simultanées, que je décris dans le chapitre 5, nous avons pu montrer que la chute de la partie interne du disque d'accrétion est visible dans les rayons X, que la naissance du nuage de plasma relativiste se voit en infrarouge, et enfin que l'expansion du même nuage est suivi grâce aux ondes radio.

Une étude multi-longueur d'onde des microquasars diffère d'une étude multi-longueur d'onde des quasars, en particulier car le disque d'accrétion présent au sein des quasars n'est pas à la même température que le disque d'accrétion au sein des microquasars. Ainsi, si le disque d'accrétion des microquasars, d'une température de quelques millions de degrés, émet principalement dans les rayons X, le disque d'accrétion des quasars, d'une température de quelques milliers de degrés, émettra, lui, principalement en UV et en optique. Les différentes longueurs d'onde provenant des microquasars et des quasars ne donneront donc pas accès aux mêmes fenêtres d'observations des phénomènes.

Ainsi, l'observation des microquasars, par leurs variations temporelles typiques de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes, doit permettre de mieux comprendre la physique géant tous les phénomènes se produisant autour d'un trou noir. Par la suite, il devrait être possible de transposer cette physique, accompagnée des phénomènes caractéristiques, aux quasars, afin de mieux les comprendre.

Finalement, non seulement l'observation des microquasars est une fin en soi car ces objets sont très intéressants à observer et à étudier, mais de plus, ils pourront très certainement permettre de mieux comprendre les quasars et les noyaux actifs de galaxies.