
Microquàsars: uns sistemes estel·lars extraordinaris

Josep M. Paredes,^{*} Josep Martí[†] i Marc Ribó[‡]

Introducció

Quan alcem els ulls en una nit estrellada d'estiu, sovint veiem una banda de llum que travessa la volta del cel amb una lluentor blanquinosa. Es tracta de la Via Làctia, la Galàxia per excel·lència dins la qual vivim. Així doncs, la pràctica totalitat d'estrel·lars observables a ull nu pertanyen a la Galàxia. Va ser només a partir del primer terç del segle XX que els astrònoms es van adonar de les veritables dimensions i constitució de la Via Làctia. Avui sabem que es tracta d'un conjunt d'estels, gas i pols amb una estructura de braços espirals d'un diàmetre de 100.000 anys llum. El Sol i el sistema solar es troben en un d'aquests braços, a una distància de 30.000 anys llum del centre galàctic.

Avui dia no només s'estudia l'Univers a través de la llum visible que emeten els estels i les galàxies, sinó també per mitjà de radiacions invisibles per a l'ull humà, però que poden ser captades amb els detectors adequats. Per exemple, per arribar a tenir la visió actual de l'estructura de la Galàxia on vivim, va ser necessari poder treballar en una banda de l'espectre electromagnètic diferent del visible, la banda de radiofreqüències. L'hidrogen neutre, que omple l'espai interestel·lar, produeix la línia espectral de 21 cm (freqüència de 1.420 MHz). A partir del seu estudi se'n va poder determinar la distribució, i, per tant, l'estructura espiral de la nostra galàxia.

Per fer un estudi multilongitud d'ona cal fer servir diferents instruments d'observació, que abasten des de les freqüències de ràdio fins als raigs γ . Només d'aquesta manera és possible assolir una visió global de l'univers que ens envolta, atès que els diferents fenòmens físics rellevants es manifesten en la pràctica totalitat de l'espectre electromagnètic. L'accés a totes les finestres espectrals ha estat potser un dels avenços més importants

de l'astrofísica del segle XX. Hi ha fenòmens i estrel·lars que no emeten llum visible però sí a d'altres longituds d'ona. A tall d'exemple podem citar els púlsars, que en general no són detectables en la regió del visible, i en canvi són emissors molt potents d'ones ràdio. També podem esmentar les radiogalàxies, els quàsars, els núvols moleculars, les explosions de raigs γ (GRB), etc. Tal com es veurà en les seccions posteriors, l'estudi global a diferents parts de l'espectre electromagnètic ha permès descobrir uns nous objectes estel·lars: els microquàsars. Per poder entendre el significat d'aquest terme, haurem d'introduir abans el concepte de quàsar.

Antecedents històrics: els quàsars

En aquest context, l'univers extragalàctic serà tot allò que es trobi fora de la nostra galàxia, lluny del seu domini d'influència gravitatòria com a interacció de més llarg abast. Les fonts extragalàctiques que emetien en l'espectre continu de radiofreqüències van ser classificades en un principi en dues classes: les que presentaven una estructura espacial extensa i les que tenien una aparença puntual semblant a la d'un estel. Les radiogalàxies pertanyen a la primera classe i els quàsars, nom que prové de la contracció de les paraules angleses *quasi-stellar radio sources*, és a dir, objectes quasi estel·lars emissors en ràdio, a la segona classe. La petita mida angular dels quàsars és deguda al fet que estan a una gran distància. Ara bé, d'alguns dels objectes classificats inicialment com a quàsars ara se'n coneix la seva estructura en ones ràdio, que els fa indistingibles de les radiogalàxies, que són més properes.

Els quàsars es van descobrir cap als anys seixanta, a partir de la identificació amb telescopis òptics de fonts d'ones de ràdio captades pels radiotelescopis. En l'òptic, presenten una aparença d'estel ordinari, la qual cosa en justifica la designació, però a la vegada amaga el fet que no són de cap manera simples estels. Aquests presumptes estels, responsables de les emissions d'ones ràdio, presentaven un espectre de línies d'emissió molt corregut vers el vermell, que si era interpretat com degut a l'expansió de l'Univers, els revelava com a objectes extragalàctics. Les seves velocitats d'allunyament respecte de nosaltres resultaven ser una fracció significativa de la velocitat de la llum. D'acord amb la llei de Hubble, que estableix una proporcionalitat entre la distància i la ve-

^{*} Josep M. Paredes Poy (Ulldecona, 1954) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona. És professor titular d'Astronomia i Astrofísica a la Universitat de Barcelona i membre de la Societat Catalana de Física (josep@am.ub.es; <http://www.am.ub.es/~josep>).

[†] Josep Martí Ribas (Mataró, 1965) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona i professor titular d'Astronomia a la Universidad de Jaén (jmartir@ujaen.es).

[‡] Marc Ribó Gomis (Barcelona, 1973) es va llicenciar en Física per la Universitat de Barcelona l'any 1996. Actualment és becar FI al Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona (mribo@am.ub.es).

locitat d'allunyament ($v = H_0 d$, on H_0 és la constant de Hubble actualment estimada en $74 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), els quàsars se situaven a unes distàncies exageradament grans. Inicialment va ser difícil trobar un mecanisme prou eficient per explicar l'enorme lluminositat observada, equivalent a la produïda per $\sim 10^{13}$ estels com ara el Sol. Si tinguéssim un quàsar al centre de la nostra galàxia, el veuríem brillar tant com la Lluna plena.

D'altra banda, s'observaven variacions de lluminositat en escales de temps de l'ordre d'un dia. Atès que cap pertorbació no es pot propagar més de pressa que la velocitat de la llum, d'acord amb els postulats de la teoria de la relativitat especial, la mida d'un quàsar no pot ser més gran que la distància que recorre la llum en l'interval en què s'ha produït la variació de l'emissió. Així doncs, les variacions observades corresponen a una mida inferior a un dia llum, equivalent a la mida del sistema solar.

Els coneixements que es tenien aleshores no permetien explicar una lluminositat tan elevada en un volum de l'espai tan petit. Avancem aquí que la resposta a aquest problema va arribar finalment del concepte, aleshores teòric, de forat negre. Si un quàsar tingués un forat negre supermassiu en el nucli, aleshores es podrien explicar els fenòmens observats.

Una troballa relativament recent en l'estudi dels quàsars ha estat feta pel satèl·lit Compton-GRO, un observatori orbital de raigs γ que ha mostrat que prop de 50 dels quàsars més potents emeten la major part de la seva radiació en raigs γ , i no en ones ràdio com s'havia cregut fins aleshores. S'ha estimat que alguns d'aquests objectes emeten raigs γ amb potències totals de $10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, valor que pot ser comparat als $10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ de la seva emissió en ones ràdio, i amb els $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ que radia la nostra galàxia. Veiem, per tant, que en els quàsars tenen lloc fenòmens altament energètics. Com es produeixen aquests fenòmens? Avui dia hi ha prou evidències observacionals que confirmen l'existència de forats negres supermassius. Una d'aquestes evidències la va obtenir el telescopi espacial Hubble en mesurar la velocitat del gas calent que està orbitant en forma de disc al voltant del centre de la galàxia el·líptica M87. Aquestes mesures van permetre obtenir la massa de l'objecte central, que va resultar ser de l'ordre de 3×10^9 masses solars (M_\odot). La captura o acreció de matèria sobre objectes compactes, com els forats negres, permet l'emissió de radiació amb potències com les esmentades anteriorment (tal com es veurà en l'apartat «Microquàsars versus quàsars»).

Un altre tret distintiu dels quàsars és la producció de jets de plasma força collimats. Els electrons d'aquest plasma són els responsables de l'emissió en ones ràdio d'origen sincrotrònic detectada inicialment. Els jets s'ejecten de manera bipolar a velocitats molt elevades, la qual cosa permet observar interessants efectes de la re-

lativitat especial, com ara l'amplificació Doppler o el moviment aparentment superlumínic, com veurem en la secció següent.

Resumint, podem dir que els quàsars són els objectes més llunyans coneguts i, per tant, formats quan l'Univers era jove. Avui dia s'accepta que els quàsars són forats negres supermassius que mostren una gran activitat i estan situats en els centres de les galàxies que els contenen. Ara bé, atesa la seva enorme distància, les galàxies amfitriones apareixen molt petites i febles, i són difícils d'observar a causa de la gran brillantor produïda pel quàsar al seu centre. Tot i així, el telescopi espacial Hubble ha estat capaç d'identificar galàxies entorn dels quàsars més propers. Actualment es coneixen milers de quàsars, dels quals el 3C273 és el més proper, situat a una distància de 2.000 milions d'anys llum, que, segons la llei de Hubble, correspon a una velocitat d'allunyament de 44.000 km s^{-1} .

Efectes de la relativitat especial observables en quàsars

Amplificació Doppler relativista

Es tracta d'una conseqüència de l'aberració relativista de la llum. Suposem que un quàsar ejecta antiparal·lelament dos núvols de plasma relativista idèntics, amb una densitat de flux de radiació S_0 en el seu respectiu sistema de referència (figura 1). L'espectre de sincrotró

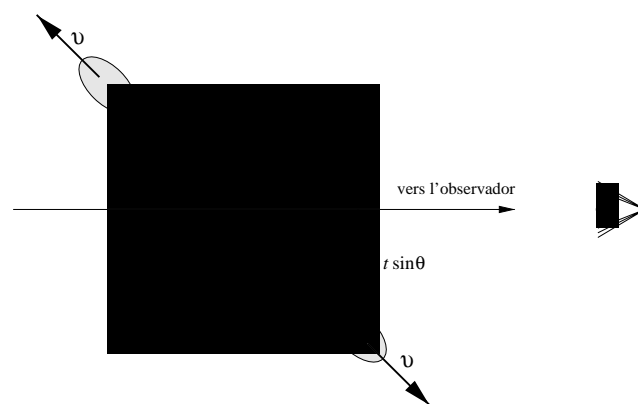


Figura 1: Esquema de l'ejecció antiparal·lela d'un parell de núvols idèntics de plasma relativista, amb velocitat v menor però propera a c . L'angle θ és el que forma la direcció vers l'observador amb la direcció d'ejecció del parell. El núvol que s'apropa s'observarà des de la Terra més brillant i movent-se més de pressa que el que s'allunya, excepte quan $\theta = 90^\circ$

de cada núvol, en funció de la freqüència ν , es caracteritza per una expressió potencial del tipus $S_0 \propto \nu^\alpha$, en la qual α és l'anomenat *índex espectral* (típicament $\alpha \simeq -0,7$). L'ejecció té lloc amb una velocitat $v = \beta c$ segons una direcció que forma un angle θ amb la visual de l'observador terrestre. Quan es fa la transformació

relativista al sistema de referència d'aquest observador, les densitats de flux transformades resulten ser diferents de S_0 . Designem amb $S_{a,r}$ la densitat de flux observada provinent del núvol que s'acosta i la del que retrocedeix, respectivament. La relació que les lliga ve donada aleshores per:

$$S_{a,r} = \frac{S_0}{[\gamma(1 \mp \beta \cos \theta)]^{k-\alpha}}, \quad (1)$$

on $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ és el factor de Lorentz i la constant k pren els valors 3 o 2 segons si es tracta de núvols discrets o d'un jet continu.

Si θ és petit ($\leq 10^\circ$) i β tendeix a 1, la brillantor del núvol que s'acosta pot veure's amplificada considerablement, i esdevenir milers de vegades més brillant que el que s'allunya. Aquest és l'anomenat *favoritisme Doppler*, que només ens deixa veure un costat del jet en quàsars llunyans, on cal una forta amplificació del plasma ejectat perquè sigui detectable.

El moviment aparentment superlumínic

Una altra conseqüència interessant de l'ejecció del plasma a velocitats properes a la de la llum és la il·lusió del moviment superlumínic, és a dir, que aquest plasma té una velocitat aparent superior a la de la llum. Aquest fenomen es produeix en considerar les posicions dels dos núvols de plasma de la figura 1 en funció del temps t , comptat a partir del moment de l'ejecció. El fet que el núvol que s'aproxima vagi reduint la seva distància en la quantitat $v t \cos \theta$ fa que la seva llum tingui un viatge vers l'observador cada cop més curt. Quan es tenen en compte els temps d'arribada dels fotons, la velocitat aparent que nosaltres creiem veure ve donada per:

$$v_{a,r} = \frac{v \sin \theta}{(1 \mp \beta \cos \theta)}, \quad (2)$$

pel núvol que s'acosta i pel que retrocedeix, respectivament. La presència del signe *menys*, corresponent al núvol que s'apropa, implica que el valor de v_a pot ser en principi arbitràriament elevat, sempre que β i $\cos \theta$ tendixin a 1. El lector en pot trobar una explicació més detallada a Paredes *et al.* (1995).

Microquàsars versus quàsars

En aquest context, els astrofísics hem assistit en els darrers anys a la consolidació del concepte de *microquàsar* (vegeu Mirabel i Rodríguez 1998 i 1999 per a una revisió actual). Es tracta d'un nou tipus d'astre, dins la nostra pròpia galàxia, amb una impressionant semblança amb els seus llunyans parents extragalàctics. Els microquàsars són simplement sistemes estel·lars dobles on un estel normal interactua fortament amb un altre estel compacte. Aquest darrer, que s'ha format a partir del col·lapse d'un estel massiu que ha passat de tenir un radi de milions de quilòmetres fins a una desena o menys, és

en la majoria dels casos un candidat a forat negre, tot i que hi ha algun cas conegut en què es tracta d'un estel de neutrons. Com a resultat d'aquesta interacció, es produeixen tota una sèrie de fenòmens molt semblants als que ja fa molts anys coneixem que es produeixen en els quàsars però a escala miniaturitzada, motiu pel qual s'empra el prefix *micro*.

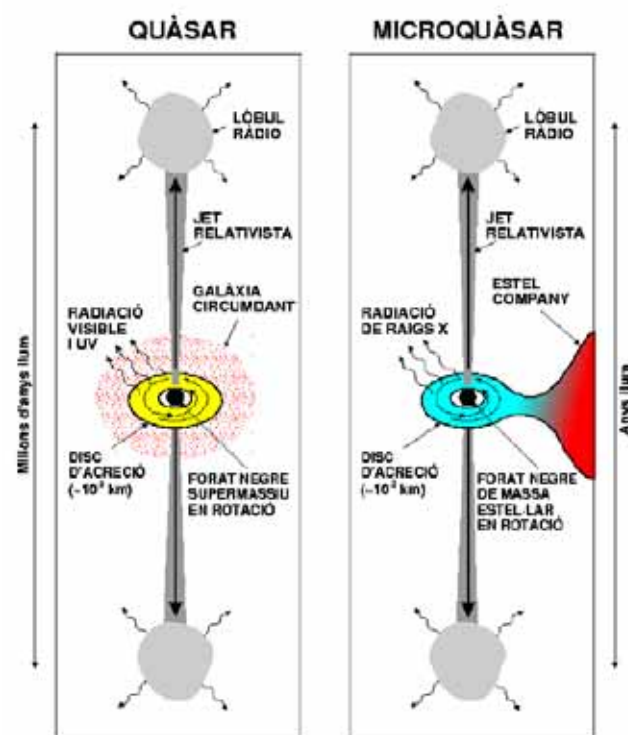


Figura 2: Il·lustració comparativa de l'analogia entre els quàsars i els microquàsars, malgrat les diferències extremes en l'ordre de magnitud dels paràmetres físics involucrats (Mirabel i Rodríguez, 1998)

L'analogia quàsar-microquàsar, il·lustrada a la figura 2, va més enllà, però, de la pura semblança morfològica. Hi ha prou evidències per creure que la física involucrada en ambdues classes d'objectes és gairebé la mateixa. Només serien diferents els ordres de magnitud dels paràmetres més rellevants, en especial la massa de l'objecte compacte. Per exemple, l'origen de la lluminositat observada en ambdós casos resulta de l'acreció, de matèria per part d'aquest objecte compacte. Es creu que en el nucli dels quàsars existeix un forat negre supermassiu amb $M \sim 10^9 M_\odot$. En contraposició, el forat negre d'un microquàsar tindria només unes $M \sim 10 M_\odot$ i seria d'origen estel·lar. Una fracció de l'energia cinètica alliberada per unitat de temps per la matèria capturada, \dot{m} , es transformaria en lluminositat L . Per a un càlcul

aproximat:

$$L \simeq \frac{1}{2} \dot{m} V^2 = \frac{GM\dot{m}}{R}, \quad (3)$$

on G és la constant de la gravitació universal, R el radi de l'objecte compacte, \dot{m} el seu ritme d'acreció de matèria i $V = \sqrt{2GM/R}$ la velocitat de caiguda lliure d'aquesta. Prenent R igual a $R_s = 2GM/c^2 = 3 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)$ km (radi de Schwarzschild)¹ per a un forat negre, tenim:

$$L \simeq \frac{1}{2} \dot{m} c^2. \quad (4)$$

D'acord amb l'equació 4, una fracció significativa de l'energia en repòs de la massa capturada pot ésser convertida en radiació. En altres paraules, l'acreció de massa per part d'un objecte compacte i col·lapsat ofereix una font d'energia molt eficient. La lluminositat observada assoleix valors representatius de $L \sim 10^{47}$ erg s⁻¹ en quàsars i de $\sim 10^{37}$ erg s⁻¹ en microquàsars. Els ritmes d'acreció corresponents són aleshores de $\dot{m} \sim 10 M_\odot$ any⁻¹ i $\sim 10^{-9} M_\odot$ any⁻¹, respectivament. Aquest flux de matèria capturada pel forat negre provindria de la galàxia amfitriona en el cas del quàsar i de l'estel company en el cas d'un microquàsar (figura 2).

La incorporació de matèria al forat negre acostuma a tenir lloc a través d'un disc d'acreció, perpendicularment al qual són ejectats els jets de plasma relativista. La matèria del disc va perdent moment angular i decau en una trajectòria espiral vers el forat negre. La pèrdua de moment angular té lloc per dissipació viscosa, la qual cosa implica un escalfament del disc. La temperatura de cos negre assolida en l'última òrbita estable al voltant d'un forat negre, que captura (acreta) matèria al límit d'Eddington,² ve donada per:

$$T \sim 2 \times 10^7 M^{-1/4}, \quad (5)$$

amb T expressada en K i M en M_\odot (Rees 1984). Així, la temperatura resulta ser de $\sim 10^5$ K i $\sim 10^7$ K per a quàsars i microquàsars, respectivament. La primera temperatura correspon al rang de radiació òptica i ultraviolada. En canvi, la segona és més pròpia del domini dels raigs X. No és gens estrany, doncs, que els quàsars fossin descoberts molt abans que els microquàsars. Per a aquests darrers, calia que la tecnologia madurés prou per poder situar telescopis de raigs X a bord de satèl·lits en òrbita terrestre.

Un altre aspecte important dels microquàsars és la seva alta variabilitat en lluminositat en escales de temps curtes. Prenent el radi de Schwarzschild com a dimensió

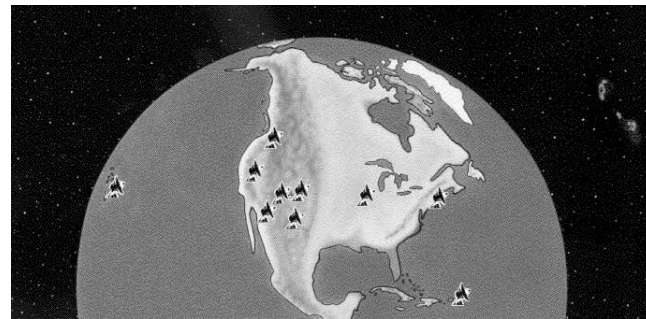
¹El radi de Schwarzschild és el d'un objecte amb velocitat d'escapament igual a la velocitat de la llum. Res, doncs, podrà escapar si l'objecte esdevé més compacte que aquest valor, tal com succeeix en els forats negres.

²El ritme d'acreció d'Eddington és aquell valor de \dot{m} que proporciona una lluminositat en què la força deguda a la pressió de radiació es fa comparable a la força de la gravetat.

característica de les regions més calentes del disc d'acreció, aquestes escales temporals vindran donades per $\tau \sim R_s/c \propto M$. Cal esperar, doncs, que fenòmens com



a)



b)

Figura 3: a) Vista aèria d'algunes de les antenes de l'interferòmetre VLA, instal·lades al desert de Nou Mèxic. b) Distribució de les 10 antenes del VLBA, escampades sobre diferents estats nordamericans

ara l'acreció de matèria, acompanyada de la producció de jets de partícules relativistes, es manifestin en variacions observables de la lluminositat en escales temporals proporcionals a la massa del forat negre, sigui quina sigui aquesta massa. Per tant, tots aquests fenòmens s'esdevindran molt més ràpidament en microquàsars ja que aquests tenen M molt més petita. La diferència de quasi vuit ordres de magnitud en el paràmetre M fa que, a la pràctica, uns quants minuts d'observació d'un microquàsar puguin equivaler a milers d'anys en la vida d'un quàsar. Així, estudiant un microquàsar resulta possible presenciar fenòmens que serien impossibles d'observar, durant una vida humana, en els quàsars extragalàctics. Aquest és principalment el motiu que desperta més expectació, i fa que se'ls consideri una autèntica pedra de Rosetta per a la comprensió dels quàsars i d'altres nuclis actius de galàxies.

Desafortunadament, el nombre d'estels binaris de tipus microquàsar, coneguts a la Galàxia fins l'any 2000, no va més enllà d'una dotzena. Entre ells, però, hi ha objectes realment extraordinaris. Podem fer esment aquí del microquàsar SS 433, famós pels seus jets relativistes en precessió cada 162,5 dies. Aquest va ser el primer microquàsar descobert, l'any 1979, el qual va romandre

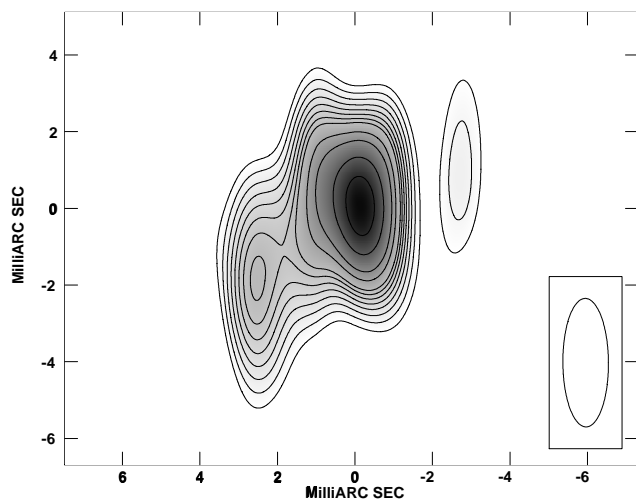


Figura 4: Mapa de radiofreqüència d'alta resolució de LS 5039 obtingut amb el VLBA i el VLA en fase a una longitud d'ona de 6 cm. L'escala de grisos indica la densitat de flux que ve donada en mJy ($1 \text{ mJy} = 10^{-26} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Així, la densitat de flux més elevada correspon a la zona central (core), de color negre, mentre que els lòbuls a esquerra i dreta (jets) són més febles i apareixen en gris i gris clar, respectivament. La presència de jets emissors d'ones ràdio en aquesta binària de raigs X d'alta massa, indica que es tracta d'un objecte de tipus microquàsar. El mapa està centrat en les coordenades $\alpha(J2000,0) = 18^{\text{h}}26^{\text{m}}15,056^{\text{s}}$ i $\delta(J2000,0) = -14^{\circ}50'54,24''$. El nord és a dalt i l'est a l'esquerra. Les corbes de nivell corresponen a 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 40 i 50 vegades el soroll de la imatge, que és de 0,085 mJy/feix. L'el·lipse de baix a la dreta, que representa el feix sintetitzat, indica la resolució angular del mapa i correspon a $3,4 \times 1,2$ mil·lèsimes de segon d'arc. Considerant que la distància a LS 5039 és de 3.000 pàrsecs (aproximadament 10.000 anys llum), una mil·lèsima de segon d'arc és equivalent a $4,5 \times 10^{13} \text{ cm}$ (3 unitats astronòmiques)

durant molts anys com un objecte únic i peculiar. També hi tenim el sistema binari Cygnus X-1, el candidat més ferm conegut a contenir un forat negre. El cas de Cygnus X-3 és també digne de menció, perquè les seves erupcions fan que la seva brillantor en ones ràdio augmenti fins a tres ordres de magnitud en pocs dies. Finalment, la família dels microquàsars també inclou

els tres únics casos confirmats de fonts superlumíniques de la Galàxia: GRS 1915+105, GRO J1655-40 i XTE J1748-288.

En aquest context, actualment s'està duent a terme un gran esforç d'identificació de nous candidats que permetin fer estudis comparatius sobre una mostra estadísticament significativa. La recerca de nous microquàsars és, doncs, una tasca necessària per tal d'assolir aquest objectiu. D'altra banda, els indicis sobre la probable connexió dels microquàsars amb les fonts no identificades de raigs γ d'alta energia, fan encara més interessant aquesta recerca. L'establiment d'aquest lligam ha estat possible recentment gràcies al descobriment del microquàsar LS 5039 pels autors.

Un nou microquàsar: LS 5039

Els microquàsars són descoberts generalment després d'una erupció, causada per un important episodi d'acreció. Els raigs X generats aleshores són detectats per satèl·lits amb l'instrumental adequat, els quals donen l'alerta a altres observatoris terrestres. Però no necessàriament és sempre així. Per exemple, el procediment seguit pels autors en el cas de LS 5039 va ser del tot diferent.

El nostre mètode es va basar en un acurat procés d'encreuament de catàlegs òptics, d'ones ràdio i de raigs X, a fi de buscar objectes que emetessin en aquestes tres bandes de l'espectre electromagnètic. A més, en aquest procés es van fer servir estrictes criteris de selecció per als possibles candidats, com ara el pendent de l'espectre d'alta energia, aspecte estel·lar en òptic i compacte en ones ràdio, etc. Un cop seleccionats, es va procedir a fer observacions específiques per intentar confirmar-ne la naturalesa. Els instruments i catàlegs més importants emprats en la nostra feina s'enumeren en el requadre 1. Entre ells, van ser el VLA i el VLBA (figura 3) els que ens van proporcionar la imatge, obtinguda el 8 de maig de 1999, que confirmava la natura de microquàsar de LS 5039 (Paredes *et al.*, 2000). Com es mostra a la figura 4, el mapa interferomètric de l'emissió en radiofreqüència d'aquest estel apareix clarament elongat degut a la presència dels jets relativistes.

Resulta raonable pensar que l'asimetria en la brillantor entre les dues components dels jets és deguda a l'amplificació Doppler relativista (vegeu l'apartat corresponent). Es pot deduir llavors que la velocitat projectada requerida és $v \cos \theta = (0,15 \pm 0,04)c$, on c és la velocitat de la llum i θ l'angle d'ejecció respecte de la visual vers nosaltres. També podem obtenir una estimació d'un límit inferior per a la velocitat del jet ($v \geq (0,15 \pm 0,04)c$) i un límit superior per a l'angle d'ejecció ($\theta \leq 81^{\circ} \pm 2^{\circ}$). És possible igualment caracteritzar altres paràmetres físics dels jets, fent la hipòtesi d'equipartició entre l'energia dels electrons relativistes i la del camp magnètic. En resulta així un

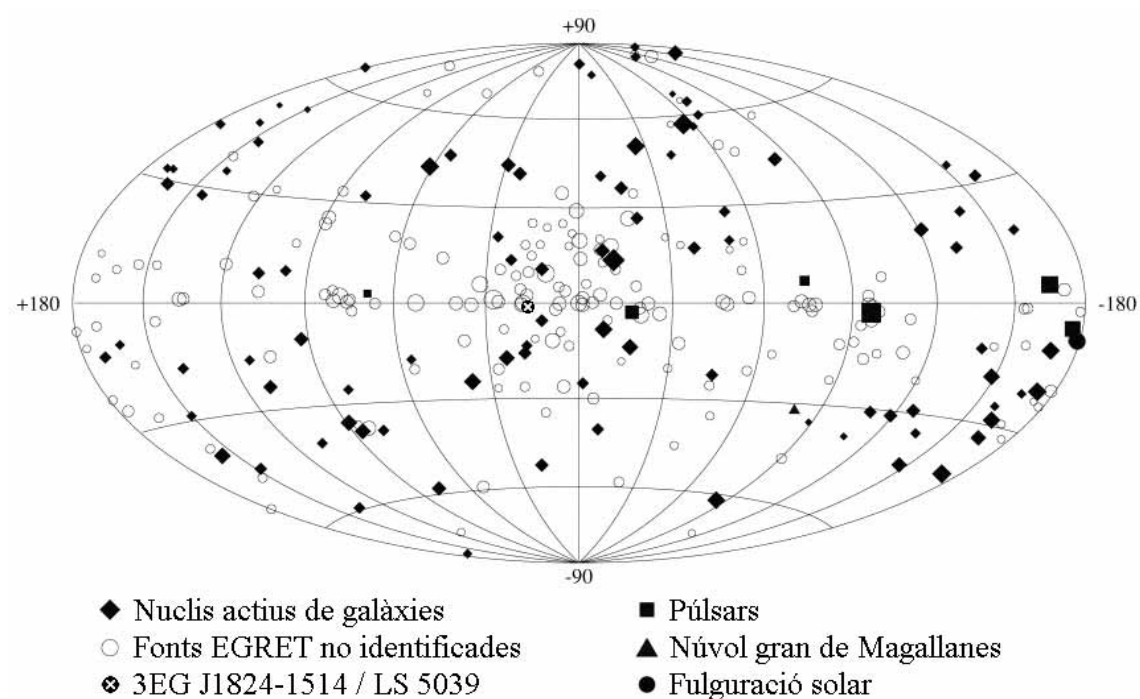


Figura 5: Recentment s'ha publicat el tercer catàleg de fonts detectades amb l'instrument EGRET. En aquesta figura es representen les posicions de les fonts del catàleg en coordenades galàctiques. El pla de la Galàxia es correspon aquí amb la línia horitzontal. La posició de la font de raigs γ 3EG J1824-1514 ha estat marcada amb una creu blanca dins un cercle negre prop de l'origen de coordenades. Tal com es pot veure, la major part de les fonts EGRET apareixen com a no identificades, especialment en la franja corresponent al pla galàctic

contingut total d'energia de $\sim 4,8 \times 10^{39}$ erg per als electrons i un camp magnètic de $\sim 0,2$ G. La lluminositat de sincrotró en radiofreqüència, entre 0,1-100 GHz és $L_{\text{rad}} \sim 7,5 \times 10^{30}$ erg s^{-1} .

El resultat positiu del mètode d'identificació, pel que fa a LS 5039, obre noves perspectives respecte a la possibilitat de descobrir nous microquàsars, que fins ara no han presentat cap explosió que ens fes saber de la seva existència. Aquest fet indica que el fenomen dels microquàsars podria ser molt més habitual del que fins ara s'havia considerat. La resta de candidats es troben encara en fase d'estudi.

LS 5039: el primer microquàsar amb emissió γ d'alta energia

A més, aquest microquàsar és l'únic emissor de raigs X del catàleg ROSAT de fonts brillants que té una posició concordant amb la font de raigs γ d'alta energia 3EG J1824-1514, la qual cosa suggereix fermament que es tracta del mateix objecte que emet en diferents bandes de l'espectre electromagnètic. Cal destacar que aquesta és la primera vegada en què es troba una associació entre un microquàsar i una font de raigs γ d'alta energia. Aquest fet és important si tenim en compte que el 63 % de les 271 fonts de raigs γ catalogades amb l'instrument EGRET ($E > 100$ MeV) no estan identificades

(vegeu figura 5). Si ens restringim a les fonts situades al pla galàctic, veiem que el 92 % no han estat identificades. D'altra banda, de les que se'n coneix la natura, 5 són púlsars de la nostra galàxia i la resta són fonts extragalàctiques. En conseqüència, aquesta troballa revela l'existència d'un nou tipus de font galàctica amb emissió γ , i indica que algunes de les fonts EGRET, fins ara no identificades, podrien pertànyer a aquesta nova classe d'objectes: els microquàsars amb emissió γ .

L'origen d'aquesta emissió, que té una lluminositat $L_{\gamma}(E > 100 \text{ MeV}) \sim 3,8 \times 10^{35}$ erg s^{-1} , estaria molt possiblement vinculada a processos d'efecte Compton invers entre els fotons ultraviolats de l'estel òptic calent i els mateixos electrons relativistes, responsables de l'emissió d'ones ràdio. El corrent energètic en aquest procés ve donat per $E_{\gamma} \sim \gamma_e^2 E_{\text{ph}}$, on les energies del raig γ i del fotó estellar estan relacionades pel factor de Lorentz dels electrons relativistes al quadrat. LS 5039 ha estat classificat òpticament com un estel de tipus O7V((f)), és a dir, un estel de tipus espectral primerenc de la seqüència principal.³ En aquest cas s'espera que una bona part de la seva lluminositat vingui donada per fotons amb energia $E_{\text{ph}} \sim 10$ eV. Per tal que aquests fotons passin a raigs γ

³Etapa durant la qual l'estel crema hidrogen en el seu nucli, que dura aproximadament el 90 % de la seva vida.

amb energies $E_\gamma \sim 100$ MeV, es necessiten electrons amb factors de Lorentz $\sim 10^3$ o, equivalentment, amb energies $\sim 10^{-3}$ erg. En la figura 6 es mostra l'escenari on es produeixen els diversos tipus de radiació.

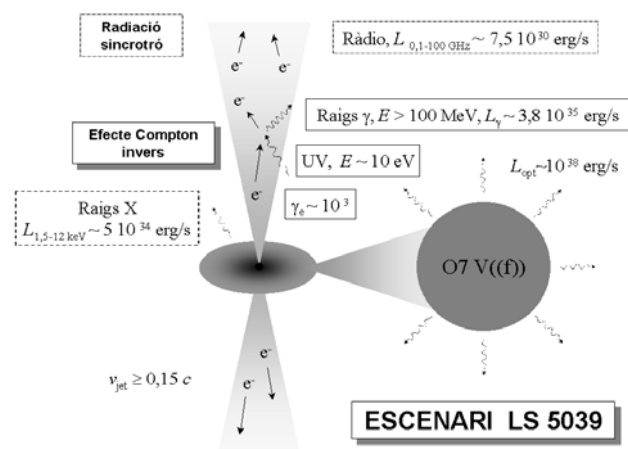


Figura 6: Escenari on es mostren els diversos tipus de radiació i el seu origen per al cas del microquàsar LS 5039. L'esquema és similar al que s'utilitza en la figura 2

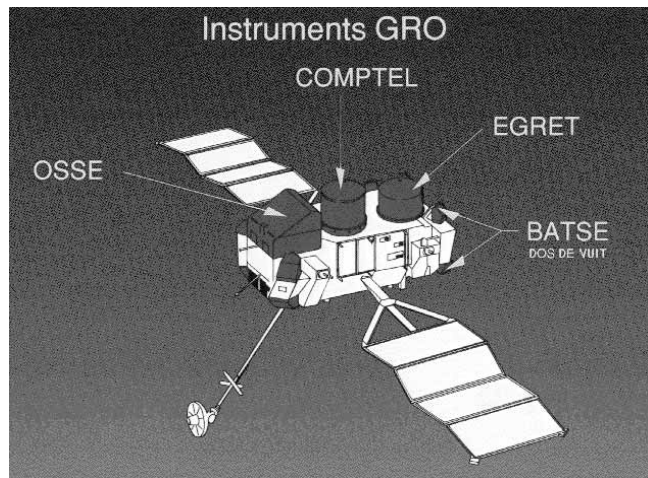


Figura 7: Satèl·lit Compton-GRO i els seus diferents instruments

Actualment la recerca d'objectes galàctics amb característiques similars a LS 5039 s'ha convertit en un objectiu prioritari atesa la importància que tenen aquests sistemes, els microquàsars, com a laboratoris propers per a l'estudi general dels jets relativistes que es troben arreu de l'Univers. També cal destacar la seva utilitat per a la comprensió dels efectes de la relativitat general en les proximitats dels forats negres.

Requadre 1

Eines per a la recerca de nous microquàsars

1. **Very Large Array (VLA)**: interferòmetre ràdio format per 27 antenes de 25 m de diàmetre que pertanyen al National Radio Astronomy Observatory (NRAO) dels Estats Units. Les antenes estan situades a l'estat de Nou Mèxic i es distribueixen en 3 braços que contenen 9 antenes cadascun, tal com es pot veure en la figura 3a. La seva separació és variable fins a un màxim de 30 km, i això proporciona una resolució angular de fins a una dècima de segon d'arc.
2. **NRAO VLA Sky Survey (NVSS)**: és un atlas de gairebé tot el cel a la longitud d'ona de 20 cm obtingut amb el VLA.
3. **Very Long Baseline Array (VLBA)**: interferòmetre del NRAO que consta de 10 antenes de 25 m de diàmetre cadascuna, escampades pel territori nord-americà, tal com es mostra en la figura 3b. La resolució angular obtinguda arriba a ser millor que una mil·lèsima de segon d'arc.
4. **Palomar Observatory Sky Survey (POSS)**: es tracta d'un atlas fotogràfic, actualment disponible en format digital, que cobreix tot el cel fins a la magnitud ~ 20 .
5. **ROSAT All Sky Survey (RASS)**: exploració de tot el cel en el domini dels raigs X tous, obtinguda pel satèl·lit alemany ROSAT (Röntgensatellit). En la seva versió de fonts brillants de raigs X conté un total de 18.811 objectes.
6. **Compton-Gamma Ray Observatory (Compton-GRO)**: ha estat un sofisticat observatori de la NASA, situat en òrbita al voltant de la Terra des de l'abril de 1991 fins al juny de 2000. Aquest observatori anava equipat amb diversos instruments capaços de detectar les emissions de raigs γ d'alta energia provinents de l'espai. En la figura 7 podem veure la localització de cadascun dels 4 instruments que formaven part del Compton-GRO. L'instrument EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*), que treballava en un rang d'energies entre 20 MeV i 30 GeV, era 10 vegades més sensible i amb un poder resolutiu angular i energètic molt superior als instruments similars disponibles abans del llançament d'aquest satèl·lit.

Agraïments

Els autors agraeixen el suport parcial de la DGEIC (PB97-0903). J. M. agraeix també el suport de la Junta de Andalusia. M. R. agraeix una beca FI de la CIRIT

(Generalitat de Catalunya, ref. 1999 FI 00199). El National Radio Astronomy Observatory és una instal·lació de la National Science Foundation dels Estats Units gestionada sota un acord de cooperació per Associated Universities, Inc.

Referències

- MIRABEL, I. F. i RODRÍGUEZ, L. F., Microquasars in our Galaxy, *Nature*, **392**, 673 (1998).
MIRABEL, I. F. i RODRÍGUEZ, L. F., Sources of Relativistic Jets in the Galaxy, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **37**, 409 (1999).
PAREDES, J. M., MARTÍ, J., RIBÓ, M. i MASSI, M., Discovery of a High-Energy Gamma-Ray-Emitting Persistent Microquasar, *Science*, **288**, 2340 (2000).
PAREDES, J. M., MARTÍ, J., ESTALELLA, R. i PERACAULA, M., Estrelles binàries de raigs X amb emissió ràdio, *Revista de Física*, **1**, 17, 2n semestre (1995).
REES, M. J., Black Hole Models for Active Galactic Nuclei, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **22**, 471 (1984).
-