

Zulo beltzen sinfonia

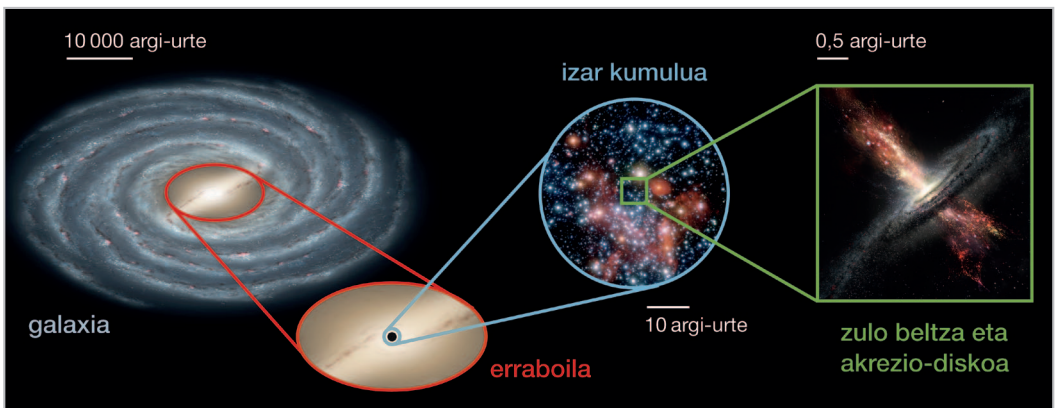
Galaxia gehienek zulo beltz erraldoia dute erdigunean. Eta benetan dira erraldoi zulo beltz horiek, milioika izarren masa ezkututzen baitute beren baitan, eta argiak ere ezin baitu haietatik alde egin. Baina zulo beltz erraldoi horiek badute galaxiotan eragin nabarmena, haien grabitazio-eremu handiek inguruko materia erakartzen baitute, eta galaxia ostalariei aldaketa bortitzak eragin diezazkiekete. Zulo beltz erraldoien eta galaxien arteko elkarrekin-tza aztertzea izan da doktore-tesi honen helburua. Ongi etorri ikuskizun kosmiko bitxi honetara: zulo beltzen sinfonia hastera doa.

Galaxien bihotz beltza

Gure inguruan dagoen guztia izarren hautsa dela esan genezake, baita gure gorputza osatzen duten atomo gehienak ere. Elementu astunak sortzeko, beharrezkoa da eztanda kosmikoak gertatzea: izar masiboen leherketak, hala nola supernobak, edota neutroi-izarren arteko talkak. Fenomeno horiek hainbeste energia igortzen dute, non oinarrizko partikulak elementu astunak osatuz berrantola

daitezkeen; aldi berean, eztrandak galaxian zehar sakabanatzen ditu elementu horiek, eta, hala, izar eta planeta berriak sortu daitezke. Horrez gain, izar masiboen leherketek zulo beltza uzten dute atzean.

Baina, zulo beltzek argia bera ere harrapatzen badute, nola ote da posible zulo beltzak aurkitu eta aztertzea? Ezin dugu ikusi zuloaren barruan zer gertatzen den, baina badugu neurtzea zulo beltzek haien inguruan zer eragin duten; hau da, zeharka aztertzen ditugu zulo beltzak, haien ondorioak ikertuz. Joan den hamarkadan, gure Esne Bidearen erdigunean dauden izarren mugimendua arreta handiz jarraituz, posible izan zen bertan zulo beltz erraldoi bat dagoela ondorioztatzea. Newtonen legeek esaten digutenez, puntu baten inguruan orbitan dauden izarrek azkarrago egingo dute bira erdiguneko masa handiagoa denean, eta horixe da ondorioztatu zutena: milaka milioi izarren masaren baliokidea dagoela kontzentratuta Esne Bidearen nukleoan (1. irudia). Gure galaxiaren erdigunean



1. irudia. Galaxia osoarekin konparatuz, oso eremu txikia hartzen dute zulo beltz erraldoiak eta haren inguruan sortzen den akrezio-diskoak. ARG.: M. Querejeta, NASA, ESO.

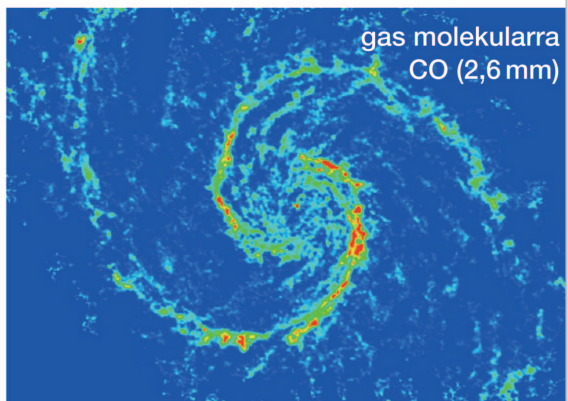
Miguel Querejeta Pérez
ESO Europako Hego Hemisferioko
Behatokiko ikertzailea



dagoen hori gugandik hurbilen dagoen zulo beltz erraldoia da, baina gure galaxiaren baitan murgilduta gaudenez, ez da erraza zulo beltzaren ondorio globalak haztatzea. Basoan gaudenean, zuhaitzak zehaztasun handiz ikus ditzakegu, baina, aldi berean, baso osoaren perspektiba galdua. Horregatik, doktore-tesi honetan, Esne Bidetik kanpo dagoen galaxia behatu dugu, M51 espiral ospetsua, hain zuzen ere.

Bidaia galaktikoa zulo beltzera

Gasaren antolamenduak garrantzi handia dauka, izar berrien sorrera baldintzatzen duelako. Eta M51 galaxian gasa ez dago geldirik, zentrorantz bidaiatzen baizik —hori da doktore-tesi honen lehen emaitza garrantzitsua—. Hori ondorioztatzeko, ezinbestekoa da galaxiaren grabitazio-eremua ondo ezagutzea. NASAREN Spitzer espazio-teleskopiotik iritsitako irudiei esker azter daiteke grabitazio-eremu hori, uhin



2. irudia. M51 galaxia kiribila. Ezkerrean, Hubble espazio-teleskopioak hartutako irudia (espektriko ikusgaia). Eskuinean, goiko irudiak NOEMA interferometroa erakusten du, Frantziako Alpeetan; behean, behatoki hori erabiliz osatu dugun M51 galaxiaren mapa, gas molekularren kokapena azaltzen duena. ARG.: ESA/Hubble; IRAM; E. Schinnerer, M. Querejeta.

infragorriak jasotzen baititu eta uhin infragorriek izarren masaren kokapena islatzen baitute. Erraza da masa horrek sortzen duen grabitazio-eremua kalkulatzeko, eta eremu horrek gasarengan zer nolako eragina izango duen. Baina, horretarako, gasaren mapa zehatza ere beharrezkoa izango zen, orain arte lortutako maparik zehatzena.

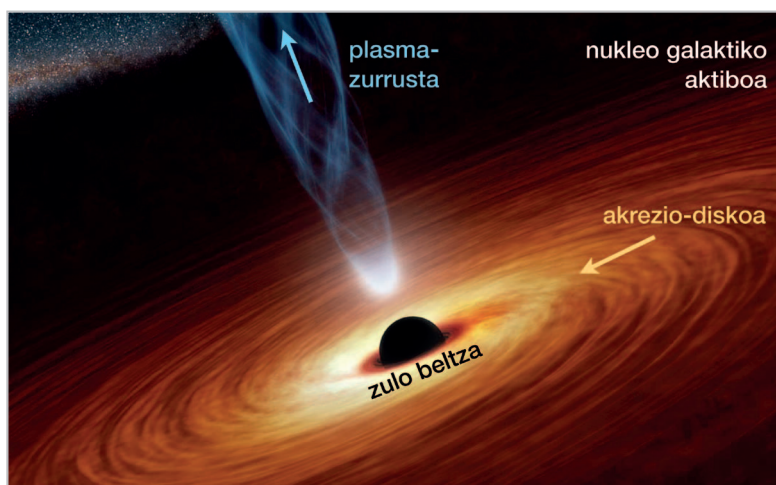
Frantziako Alpeetan, 2.550 metroko altueran, NOEMA interferometroaren antena parabolikoek so egiten diote unibertsoari. Neguan, eskiatzaillez josita egoten dira antenen inguruko muinoak; izan ere, astronomok teleaulkiak erabiltzen ditugu teleskopio horietara igotzeko. Antena parabolikoek irrati-uhinak jasotzen dituzte, eta haien bidez, gas molekularren kokapena eta mugimendua azter daiteke. Gainera, hainbat antenak jasotako informazioa konbinatuz, oso bereizmen handiko irudiak lor ditzakegu. Molekulek uhin-luzera zehatz batzuetan igortzen dute energia, trantsizio kuantikoen ondorioz; CO molekularren funtsezko trantsizioak, esaterako, 2,6 milimetroko uhin-luzera dauka. M51 galaxian igorpen-lerro hori hauteman dugu NOEMA erabiliz, orain arte kanpoko galaxia batean lortutako doitasun handienarekin (2. irudia).

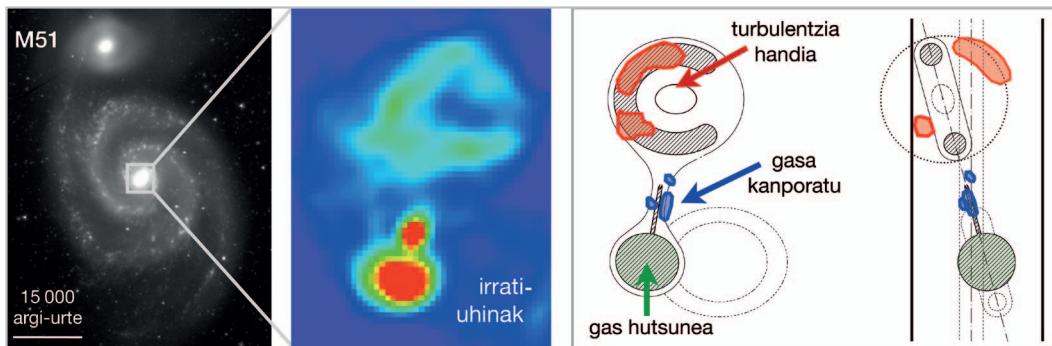
Hortaz, CO molekularren 2,6 mm-eko dagokien lerroa trazatzaile gisa erabiliz, galaxiaren eremu grabitatorioak gas molekularrari eragiten dion mugimendua neurtu ahal izan dugu (edo, hobeto esan, eremu horrek zer nolako aldaketa eragiten dion momentu angeluarrean). Kalkulu horrek argi eta garbi azaldu du gasak pixkanaka zentrorantz mugitzeko joera duela; batez beste, Eguzkiaren masaren baliokidea iristen da urtero galaxiaren nukleora. Beraz, M51 galaxiaren zulo beltz erraldoia gas molekularra irensten ari da etengabe, eta materia transferentzia horrek baditu ondorio garrantzitsuak, hurrengo atalean azalduko dugun bezala.

Quasarrek eta M51ren nukleoak badute zerikusia

Quasarrak energia-dentsitate handiko iturri astronomikoak dira, eta energia elektromagnetiko izugarria igortzen dute eremu txiki batetik. Hasiera batean, ez zegoen argi energia horren jatorria zein zen. Gaur, badakigu galaxien nukleoetan dauden zulo beltz erraldoietara erortzen ari den gasa dela haien jatorria. Zulo beltzen inguruan akrezio-diskoak sortzen dira, eta bertako eremu magnetikoek intentsitate handia hartzen dute, elektroiak eta beste oinarritzko partikulak azeleratuz; irrati-

3. irudia. Nukleo galaktiko aktiboa irudikatzen du marrazki honek, zulo beltzaren inguruan garatutako akrezio-diskoarekin eta plasma zurrustarekin. Gasa etengabe ari da zulo beltzera erortzen, eta oinarritzko partikulek zuloa gerturatzerakoan hain abiadura handia hartzen dute, non diskoarekiko zut materia kanporatzen duen zurrusta sortzen den. Geziek materiaren norabidea adierazten dute. ARG.: NASA/JPL-Caltech.





4. irudia. Ezkerrean, M51 galaxiaren nukleoan dagoen plasma-zurrusta erakusten dute irradi-uhinek (uhin-luzera: 20 cm). Eskuinean, plasma-egitura horien eskema ageri da (aurretik eta albotik ikusita), eta nukleo aktiboaren efektu nabarmenenak ikus daitezke. ARG.: M. Querejeta.

uhinen bidez behatu daitezkeen plasma-zurrusta erraldoiak ere sortzen dituzte (3. irudia).

Badakigu M51 galaxiaren nukleoan akrezio-diskoa garatu dela, irradi-uhinen bidez plasma-zurrusta ikus dezakegulako. Paradoxikoki, nukleo aktibo horren efektu nabarmenena da gas molekularra nukleotik kanpo jaurtitzea: zulo beltzera ailegatzeko den masa-transferentziak kontrako efektu hori eragiten du, eremu magnetikoek lagunduta. NOEMAren mapak abiadurari buruzko informazioa ematen digutenez, xehetasun handiz azter dezakegu higidura hori, eta zenbat masa kanporatzen ari den neurtu. Nukleoan nolabaiteko oreka dinamikoak lortu dela esan genezake: gas-kantitate txiki bat zulo beltzera erortzeak eragiten du gas gehiena nukleotik ateratzea; muturreko kasuetan, gasak galaxiatik alde egiten du, eta horrek guztiz mugatuko du galaxiaren etorkizuna. Gasaren kanporatze-tasa hori neurtzea izan da, bestalde, tesiaren emaitza nagusia; horretarako, eredu dinamikoekin alderatu dugu NOEMA interferometroak neurtutako gasaren kokapena eta abiadura, eta ondorioztatu dugu gas hori 300.000 km/h-ko abiadurarekin mugitzen ari dela nukleotik at.

Lehenbizikoz frogatu dugu tesi honetan zulo beltz erraldoiaren ingurutik gasa kanporatzeaz gain plas-

ma-zurrustak gasaren egoera ere aldatzen duela. Zurrusta hori argiaren antzeko abiadurarekin mugitzen diren partikulez osatuta dago, eta, efektu magnetohidrodinamikoak direla medio, zeharkatzen duen gasaren turbulentzia handitzen du. Aldi berean, turbulentiak gasaren kolapsoa saihestu dezake: horregatik ez dago izar gazterik M51 galaxiaren nukleotik hurbil, nukleoak berak gasa antzu bihurtu duelako. 4. irudiak plasma-zurrustaren kokapena erakusten du, eta gasari eragiten dizkion efektuak laburbiltzen ditu.

Litekeena da quasarrek ere halako mekanismo bati esker kontrolatzea izarren jaiotza-tasa. Galaxien nukleo aktiboek, quasarren distira azaltzeaz gain, galaxien bilakaera ere baldintza dezakete. Bestela, galaxiek askoz azkarrago transformatuko lukete gasa izarra sortzeko, eta gure inguruko galaxia guztiek kolore gorria izango lukete (izar zahar eta hotzen kolorea), beso espiralik gabe, ezinezkoa baita beso espiralak gasik gabe mantentzea. Beraz, zulo beltz erraldoien eta galaxien arteko elkarrekintza behar-beharrezkoa da gaur egungo galaxien aniztasuna azaltzeko, eta mekanismo horren xehetasun garrantzitsuak jakitera eman dituzte M51 galaxian egin ditugun behaketek.

Zulo beltzak ikusi eta entzun

2015eko irailaren 14an, bi zulo beltz elkartzean sortutako grabitazio-uhinak detektatu zituen LIGO behatokiak. Grabitazio-uhinen lehen detekzio zuzena izan zen hura, eta Fisikako Nobel saria eman zieten Rainer Weiss, Barry C. Barish eta Kip S. Thorne zientzialariei, grabitazio-uhinak behatzea posible egiteagatik. Lehen detekzio horri GW150914 izena eman zioten; ez da oso izen poetikoa, egia esan, baina gertaeraren data erabiltzeak sailkapena errazten du. Talka egin zuten zulo beltz horiek 30 eguzki-masa inguru zuten; beraz, doktore-tesi honetan aztertu dugun zulo beltz erraldoiarena baino askoz masa txikiagoa. 2017ko abuztuaren 17an, LIGOk beste grabitazio-uhin batzuk detektatu zituen; bosgarren detekzioa izan zen, baina GW170817 horrek bazuen aparteko ezaugarri bat. Lehen aldiz, grabitazio-uhinen seinalea jasotzeaz gain, gertaera hori espektriko elektromagnetiko osoan zehar detektatu ahal izan genuen zientzialariorik. Bi neutroi-izarren arteko topaketa horrek argi utzi zuen badagoela astrofisika aztertzeke era berri bat: unibertsoari so egiteaz gain, espazio-denboran zehar hedatzen diren grabitazio-uhinak entzun daitezke aldi berean.

Azaldu dugun bezala, zulo beltz erraldoiek sekulako garrantzia dute galaxientzat, gasaren kokapena eta egoera kontrolatuz izar berrien jaiotza baldintzatzeko dutelako (eta, hortaz, galaxia osoen etorkizuna mugatu). Zulo beltzak zeharka ikusi ditzakegu, baita mundu horiek galaxietan zer eragin duten neurtu ere. Oraindik asko ikasi behar dugu galaxiek bere baitan ezkutatzeko duten motor boteretsu horren portaerari buruz, baina grabitazio-uhinek zeregin horretan lagundu diezagukete. Liluragarria izango litzateke galaxien nukleo misteriotsu horiek aldi berean ikusi eta entzutea, eta zulo beltzen sinfoniaren hurrengo konpasa osatzea. ●

Bibliografia

Sparke, L. S.; Gallagher, J. S. *Galaxies in the Universe* (Cambridge University Press, 2000).

Crane, P. C.; van der Hulst, J. M. (1992). "The radio jet in M51", *The Astronomical Journal*, 103: 1146-50.

Fabian, A. C. (2012). "Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50: 455-89.

Querejeta, M.; Meidt, S. E.; Schinnerer, E. et al. (2015). "The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G)", *The Astrophysical Journal Supplement*, 219: 5, 1-19.

Querejeta, M.; Schinnerer, E.; Meidt, S. E. et al. (2016a). "Gravitational torques imply molecular gas inflow towards the nucleus of M51", *Astronomy & Astrophysics*, 588: 33, 1-19.

Querejeta, M.; Schinnerer, E.; García-Burillo, S. et al. (2016b). "AGN feedback in the nucleus of M51", *Astronomy & Astrophysics*, 593: 118, 1-21.

Schinnerer, E.; Meidt, S. E.; Pety, J. et al. (2013). "The PdBI Arcsecond Whirlpool Survey (PAWS)", *The Astrophysical Journal*, 779: 42, 1-29.