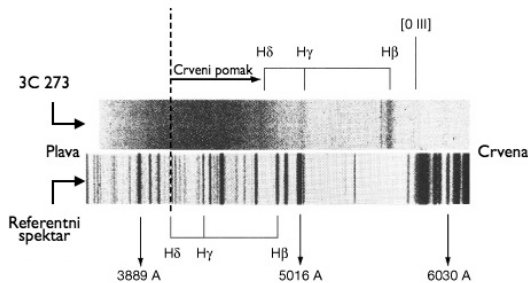




Supermasivne crne rupe

Ana Babić*

Ako pitate astronome, već od 60-tih godina prošlog stoljeća crne rupe nisu samo teorijski objekti. Tada su na nebu opaženi jaki izvori radio zračenja koji u vidljivoj dijelu spektra imaju zvjezdoliki izgled¹, tzv. kvazari (skraćeno od 'kvazi-zvjezdani objekti'). Pomoću crvenog pomaka njihovih spektralnih linija (vidi sliku 1) dokazano je da se ne nalaze unutar naše galaksije, već na velikim kozmološkim udaljenostima, u središtima dalekih galaksija.



Slika 1. Spektar kvazara 3C 273 (gore) i usporedni spektar (dolje; emisijski spektar vodika, helija i neona mjereno u laboratoriju) pomoću kojeg je Maarten Schmidt 1963. godine dokazao da su kvazari ekstragalaktički objekti na kozmološkim udaljenostima. Identificirane su linije vodika $H\beta$, $H\gamma$ i $H\delta$, ali pomaknute prema crvenom dijelu spektra za $z \equiv \Delta\lambda/\lambda \approx 0.158$, što ukazuje na veliku brzinu udaljavanja od nas $\sim 48\,000$ km/s (tako velike brzine su posljedica širenja svemira, a ne vlastitog gibanja izvora) i ogromnu udaljenost, približno 500 megaparseka. Osim udaljenosti, značajna je bila i velika širina linija u odnosu na usporedni spektar, koja ukazuje na gibanja velikim brzinama unutar samog izvora. Opaženi sjaj kvazara, u kombinaciji s navedenom udaljenošću implicirao je da luminozitet ovog naizgled zvjezdastog objekta stotinu do tisuću puta nadmašuje luminozitet do tada opaženih velikih galaksija.

Uzevši u obzir veliku udaljenost od nas² i činjenicu da se ti objekti zaista opažaju, zaključujemo da moraju imati izuzetno visoki luminozitet (ukupna energija zračenja koja napušta objekt u jedinici vremena). Tada je predloženo da je najvjerojatnije objašnjenje za izvor tako velike količine energije pad materije u područje izuzetno jakog gravitacijskog polja, kakvo se nalazi u blizini crne rupe. Tijekom sljedećih pedeset godina opažene su promjene sjaja ovih izvora na kratkim vremenskim skalama koje ukazuju na male dimenzije izvora energije, od nekoliko svjetlosnih dana ili svjetlosnih tjedana (za usporedbu, udaljenost Zemlje i Sunca je približno devet svjetlosnih minuta).

* Institut "Ruder Bošković", e-pošta: Ana.Babic@irb.hr

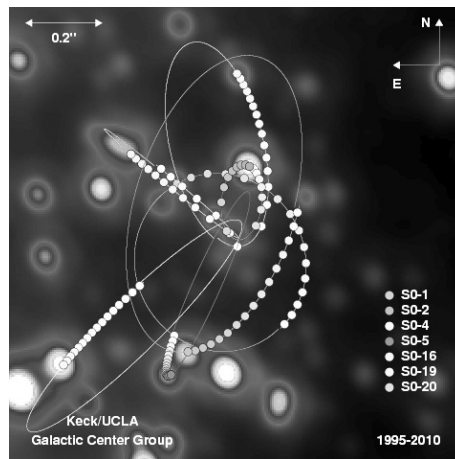
¹ 'Zvjezdoliki' izvori ovdje znači približno točkasti izvori, za razliku od galaksija koje imaju više difuzan sjaj.

² Opaženi prividni sjaj nekog objekta pada s kvadratom udaljenosti.

Opažene su i emisijske linije u X-području koje se dobro objašnjavaju relativistički proširenim $K\alpha$ linijama željeza koje emitiraju plin i prašina zagrijani na temperaturu od nekoliko desetaka tisuća kelvina i gibajući se brzinama usporedivim s brzinom svjetlosti u blizini horizonta crne rupe. Prethodno opisana opažanja su dodatno osnažila argumente za postojanje crnih rupa, no najjači argument do danas su opažanja crne rupe u središtu naše galaksije.

Supermasivna crna rupa u središtu Mliječnog puta

U središtu naše galaksije, udaljena od nas oko 25 000 svjetlosnih godina³ i skrivena iza velike količine plina i prašine, nalazi se crna rupa mase 4 milijuna puta veće od mase Sunca ($M_{\bullet} = 4 \times 10^6 M_{\odot}$, gdje je M_{\odot} masa Sunca). Za razliku od blještećih kvazara, 'naša' supermasivna rupa je 'neaktivna', tj. aktivnost koja se opaža u vidu zračenja je vrlo niska, na razini tek jedne obične zvijezde. Iako nam je središte galaksije relativno blizu, niski luminozitet i količina materije kroz koju je potrebno gledati u tom smjeru, onemogućuju izravna opažanja u vidljivom dijelu spektra. No, promatranje u infracrvenom dijelu spektra, u kojem su plin i prašina znatno prozirniji, omogućuje pogled na zvijezde koje kruže oko središta galaksije (vidi sliku 2).



Slika 2. Orbite zvijezda unutar 1.0×1.0 lučne sekunde oko centra naše galaksije, u periodu od 1995. do 2008. godine. Pozadina slike je snimka centralnog dijela galaksije snimljena 2010. godine Keck teleskopom u bliskom infracrvenom području (valna duljina 2.2 mikrona). U crtane su putanje sedam zvijezda, od ukupno 28 čije su orbite imale dovoljnu zakrivljenost da omogućiti određivanje njihovih orbitalnih parametara. Obojane točke označavaju prosječne godišnje položaje za tih sedam zvijezda, gdje porast zasićenja boje označava kasnije godine. Primijetite i da je na slici vidljiva akceleracija zvijezda jer se udaljenosti uzastopnih točaka mijenjaju (slika u boji na naslovnici).

Od 1992. godine traje organizirano promatranje tih zvijezda, svake godine u prosjeku nekoliko dana. Jedna zvijezda, imena S2, je u tom periodu prošla svoju punu orbitu,

³ 1 svjetlosna godina (ly) = 9.5×10^{12} km = 0.31 parseka (pc),
1 pc \approx 320 000 astronomskih jedinica (AJ)

te su joj određeni polumjeri apocentra (točka putanje najudaljenija od fokusa elipse u kojem se nalazi središnja masa) i pericentra (točka najbližeg prolaza središnjoj masi), 0.0089 parseka i 0.00058 parseka. Najbliži prolazak S2 središnjoj masi bio je tijekom 2002. godine i tada su se mogle opažati promjene njezine brzine na skali od nekoliko mjeseci. Sljedeći takav prolazak biti će početkom 2018. godine (period S2 je 15.8 godina), pa očekujte da će tada puno digitalnih očiju biti upereno prema središtu galaksije! Iz opažanja su određeni parametri orbita i za dodatnih 25 zvijezda, te se nedvojbeno zaključilo da je masa središnjeg objekta $4 \times 10^6 M_{\odot}$ (vidi okvir 1).

Gruba procjena mase središnje crne rupe iz brzine i udaljenosti zvijezde S2 prilikom prolaska kroz pericentar (točku najbližeg prolaza središnjoj masi).

Na eliptičnoj putanji oko središta mase, zvijezda će najveću brzinu postići u pericentru. Iz slike je očito da elipsa ima različite polumjere zakrivljenosti u različitim točkama – najmanji u pericentru i apocentru, a najveći između te dvije točke. U točki pericentra (i apocentra) polumjer zakrivljenosti je dan s $R = b^2/a$, gdje su b i a duljine male i velike poluosi elipse (vidi donju skicu). (U slučaju kružnice $b = a$, pa je polumjer zakrivljenosti jednak polumjeru kružnice.)

Uzmimo da je najveća izmjerena brzina zvijezde S2 tijekom njezine orbite približno $v_{S2} \simeq 8500$ km/s, te da su udaljenosti točke pericentra i apocentra od crne rupe $r_p = 0.00058$ pc i $r_a = 0.0089$ pc. Iz ovih podataka, uz donju sliku lako nalazimo duljine velike i male poluosi, $a = 0.0047$ pc i $b = 0.0023$ pc, te polumjer zakrivljenosti u pericentru $R = 0.0011$ pc.

Za ovakvo gibanje, gravitacijska sila igra ulogu centripetalne sile koja zvijezdi omogućava da ostane na eliptičnoj putanji. U točki pericentra, izjednačavanjem centripetalne sile F_{cp} i gravitacijske sile F_{grav} kojom crna rupa privlači zvijezdu dobivamo procjenu mase crne rupe:

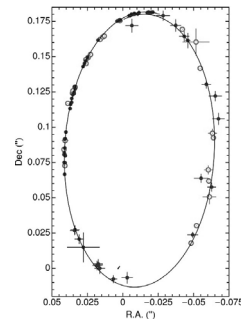
$$F_{cp} = F_{grav}, \tag{1}$$

$$\frac{m_{S2} v_{S2}^2}{R} = G \frac{M_{\bullet} m_{S2}}{r_p^2}, \tag{2}$$

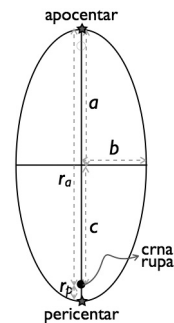
gdje je M_{\bullet} masa središnje crne rupe, m_{S2} i v_{S2} su masa i brzina zvijezde S2, r_p udaljenost crne rupe i S2 u pericentru, R je polumjer zakrivljenosti putanje u pericentru, te gravitacijska konstanta $G = 6.674 \times 10^{-11}$ N (m/kg)² = 4.302×10^{-3} pc M_{\odot}^{-1} (km/s)².

Slijedi izraz za masu

$$M_{\bullet} = \frac{v_{S2}^2 r_p^2}{G R} = \frac{(8500 \text{ km/s})^2}{4.302 \cdot 10^{-3} \text{ pc } M_{\odot}^{-1} (\text{km/s})^2} \frac{(0.00058 \text{ pc})^2}{0.0011 \text{ pc}} \simeq 5.2 \cdot 10^6 M_{\odot}. \tag{3}$$



Slika 3. Orbita zvijezde S2, s mjerenim podacima sa NNT/VLT teleskopa (plavo) i Keck (crveno) teleskopa. Crna crta je izračun pod pretpostavkom gibanja po Keplerovoj orbiti.



Pokazano je i da se najveći dio te mase zaista nalazi unutar pericentra, dakle na području manjem od 0.001 parseka, što je približno 200 astronomskih jedinica (AJ). Usporedite to s prosječnim promjerom Plutonove orbite oko Sunca, približno 80 AJ. Zamislite — prostor promjera dvostruko većeg od promjera Sunčevog sustava, ali umjesto Sunca i planeta u njega smjestite masu 4 milijuna Sunca. Pri tome, luminozitet ograničite na luminozitet samo jednog Sunca! Pokazano je teorijski, da bi skup tamnijih objekata kao što su bijeli patuljci ili neutronske zvijezde, takve mase i ograničen na takav prostor, neizbježno kolabirao u crnu rupu na vremenskim skalama znatno manjim od vremena potrebnog za jednu rotaciju naše galaksije. Dakle, supermasivna crna rupa je jedini objekt u skladu s poznatim stanjima materije koji objašnjava opažanja.

U posljednjih dvadesetak godina, iz studija gibanja i sjaja središnjih zvjezdanih skupova u više od trideset susjednih galaksija postalo je jasno da svaka velika galaksija ima središnju supermasivnu crnu rupu, s masom između milijun i nekoliko milijardi sunčevih masa. Zbog jedinstvenog položaja ovakvih objekata, isključivo u središtu galaksije, te izuzetno velike mase, jasno je da su ovi objekti bitno različiti od crnih rupa koje nastaju kolapsom jedne zvijezde⁴. No kako je uopće moguće izgraditi crnu rupu mase nekoliko milijuna ili milijardi puta veće od Sunčeve mase?

Aktivne crne rupe — male, ali značajne

Pomoć u rješavanju ove zagonetke došla je u vidu otkrića veze sa svojstvima galaksija u kojima se crne rupe nalaze te u vidu spoznaje da su neaktivne supermasivne crne rupe ostaci aktivnih galaktičkih jezgara.

U posljednjih dvadesetak godina otkriveno je da je masa svake supermasivne crne rupe povezana s masom određenih struktura u galaksiji, točnije dijela galaksije koji je sfernog oblika i izgrađen gotovo isključivo od zvijezda⁵. Ako se uzme u obzir da galaksije tijekom svoga života rastu, te da su ugrubo teže (i veće) galaksije starije, zajedno s činjenicom da manje galaksije imaju manje crne rupe i obrnuto, može se zaključiti da rast crne rupe slijedi rast galaksije, tj. da rastu istovremeno. Kako točno rastu istovremeno se još uvijek ne zna sa sigurnošću, ali je vrlo vjerojatno da iste nestabilnosti⁶ koje potiču stvaranje zvijezda potiču i rast supermasivnih crnih rupa.

Da bi dosegle današnje mase, supermasivne crne rupe, iako danas neaktivne, morale su doživjeti jedan ili više perioda intenzivnog rasta u kojima su velikom brzinom gutale materiju iz okoline. Ali hranjenje crnih rupa nije neprimjetan događaj. Prije nego prođe točku iza koje više nema stabilnih orbita, materija na putu u crnu rupu izrači veliku količinu energije koju mi možemo opažati u širokom području elektromagnetskog spektra, od radio valova do X zračenja. Na primjer, dovoljno je da crna rupa 'proguta' materiju mase samo jednog Sunca godišnje i pri tome će njezin sjaj nadmašiti sjaj cijele galaksije u kojoj se nalazi. Dakle, tijekom perioda brzog rasta, da ih je netko promatrao, supermasivne crne rupe bile bi opažene i klasificirane kao aktivne galaktičke jezgre⁷.

⁴ Takve crne rupe imaju masu usporedivu s masom Sunca, $1 - 20 M_{\odot}$, nalaze se posvuda gdje ima zvijezda u galaksiji, a ukupan očekivani broj tih crnih rupa po jednoj galaksiji je desetak milijuna.

⁵ U spiralnim galaksijama ta se struktura naziva jezgra, a u eliptičnim cijela galaksija zapravo čini tu strukturu.

⁶ Nestabilnosti mogu na primjer biti uzrokovane bliskim prolasci drugih galaksija, proždiranjem malih susjednih galaksija, sudarima galaksija.

⁷ Aktivne galaktičke jezgre su sve supermasivne crne rupe u središtima galaksija koje pokazuju aktivnost iznad nivoa koji bi proizvele zvijezde, bar u nekom dijelu spektra. One su šira klasa od kvazara, koji su aktivne galaktičke jezgre s vrlo visokim luminozitetom u vidljivoj dijelu spektra.

Zbog velike količine energije koja se oslobodi prilikom hranjenja supermasivne crne rupe, ona utječe na rast galaksije u kojoj se nalazi. To je bio jedan od iznenađujućih rezultata niza velikih simulacija nastajanja galaksija i rasta velikih struktura u svemiru (na skalama puno većih od galaksija). Naime, galaksije bi danas bile puno sjajnije da energija oslobođena iz okolice crnih rupa nije grijala plin i onemogućavala intenzivnije rađanje zvijezda. Efekt postoji unatoč tome što je sfera gravitacijskog utjecaja supermasivne crne rupe suviše mala da bi direktno utjecala na gibanje zvijezda ili plina na galaktičkoj skali. Na primjeru naše galaksije vidimo da je objekt čija je sfera gravitacijskog utjecaja samo približno jedan parsek (vidi okvir 2) utjecao na rast okolne galaksije vidljivog polumjera oko 15 kiloparseka, dakle oko deset tisuća puta većih dimenzija. Svi detalji mehanizama putem kojih se odvija taj utjecaj supermasivnih crnih rupa na njihove galaksije još nisu potpuno poznati, ali je jasno da je današnji izgled svemira djelomično rezultat njihove aktivnosti.

Sfera gravitacijskog utjecaja crne rupe.

U samom središtu svake masivne galaksije nalazi se supermasivna crna rupa, ali oko nje se nalazi i veliki broj zvijezda koje čine središnji zvjezdani skup. Usporedbom gravitacijskog potencijala središnje crne rupe i zvjezdanog skupa nalazi se karakteristični polumjer koji definira sferu gravitacijskog utjecaja crne rupe

$$r_g = \frac{GM_\bullet}{\sigma^2}, \quad (4)$$

gdje je G gravitacijska konstanta, M_\bullet masa crne rupe, a σ je tipična brzina nasumičnog gibanja zvijezda u središnjem skupu.

Ispod ovog polumjera kretanje zvijezda je najvećim dijelom pod utjecajem crne rupe, dok izvan r_g crna rupa ima zanemariv doprinos i zvijezde se kreću uglavnom pod utjecajem gravitacijskog međudjelovanja s ostalim zvijezdama u blizini.

Za Mliječni put masa središnje crne rupe je $M_\bullet = 4 \times 10^6 M_\odot$, a tipična brzina nasumičnog gibanja zvijezda u središnjem skupu $\sigma = 100 \text{ km/s}$ te za polumjer gravitacijskog utjecaja dobijemo

$$r_g = \frac{(4.302 \cdot 10^{-3} \text{ pc } M_\odot^{-1} (\text{km/s})^2) \cdot (4 \cdot 10^6 M_\odot)}{(100 \text{ km/s})^2} \quad (5)$$

$$r_g \simeq 1 \text{ pc} \quad (6)$$

Samo jedan parsek! Usporedite to s (vidljivim) polumjerom naše galaksije $r \sim 15 \text{ kpc}$.

Kakva je budućnost 'naše' supermasivne crne rupe?

Danas znamo da su periodi jake aktivnosti supermasivnih crnih rupa povezani s periodima intenzivnog stvaranja zvijezda. Iz broja mladih zvijezda u našoj galaksiji, znamo i da živimo u relativno mirnom periodu naše galaksije, te ne očekujemo vidjeti intenzivnu aktivnost iz njezinog središta u skorjoj budućnosti. Poticaj za jaču aktivnost bi npr. bio sudar naše galaksije i galaksije Andromeda (M31), koji je po nekim scenarijima moguć, ali tek za vrijeme približno pola sadašnje starosti svemira! Takav događaj bi gurnuo veću količinu plina i prašine prema središtu galaksije i nahranio crnu rupu (tj. nahranio bi obje supermasivne crne rupe, našu i Andromedinu).

No, periodi nešto niže aktivnosti su mogući i ranije. Postoje indicije (odsaj koji nam stiže s oblaka plina i prašine blizu središta galaksije) da je prije 300-400 godina naša crna rupa 'progutala' nešto materije iz okoline i imala kratki period pojačane aktivnosti. Iako se sjaj pojačao nekoliko milijuna puta, još uvijek je aktivnost bila dovoljno niska da ne bude zapažena u vidljivom području spektra kroz plin i prašinu koja crnu rupu dijeli od nas.

Ako mislite da je šteta što prije 300–400 godina nije bilo teleskopa sposobnih za promatranja u infracrvenom, X ili gama dijelu spektra pomoću kojih bi se takav događaj mogao zabilježiti, postoje dobre vijesti. Opažen je gusti oblak prašine mase oko tri puta veće od Zemlje koji će 2013. godine proći vrlo blizu središta galaksije. Budući da taj oblak nije snažno gravitacijski vezan kao što su zvijezde koje kruže oko crne rupe, vrlo vjerojatno će se raspasti. Veliki dio njega bi pri tome trebao biti povučen u akrecijski disk⁸ i uzrokovati pojačanje aktivnosti. Takav događaj bi nam mogao otkriti dodatne detalje u vezi naše crne rupe, kao što je njezina brzina vrtnje i uvjete u njezinoj okolini, uključujući svojstva akrecijskog diska.

Osim ovakvih događaja, astronomi se nadaju da će uskoro, kombinacijom opažanja radioteleskopa raspoređenih po cijeloj Zemlji (*Event Horizon Telescope*), uspjeti direktno promatrati 'sjenu' horizonta supermasivne crne rupe u središtu Mliječnog puta. Detektori gravitacijskih valova (npr. *LIGO*, *LISA*) trebali bi u sljedećih desetak godina opaziti signale koji su odaslani u završnim fazama sudara galaksija, kada se dvije supermasivne crne rupe približavaju po spiralnoj putanji. Krajnje faze takvog spiralnog kruženja u kojima su crne rupe blizu i kruže velikim brzinama, te trenutak spajanja u jednu supermasivnu crnu rupu, moraju biti jaki izvori gravitacijskih valova. Crne rupe više nisu samo teorijske zanimljivosti — za njihovo postojanje imamo čvrste dokaze, a detalji njihove okoline i prehrambenih navika se intenzivno proučavaju. U sljedećih deset do dvadeset godina, kao rezultat rada novih teleskopa, očekuje se značajan pomak u našem razumijevanju tih objekata.

Ako želite znati više

Animacija orbita zvijezda u centralnoj lučnoj sekundi naše galaksije:

<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/orbitsMovie.shtml>

Općenitije o crnim rupama u astronomiji:

http://www.spacetelescope.org/science/black_holes/

<http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes/>

Dokumentarni film o supermasivnim crnim rupama:

<http://video.google.com/videoplay?docid=-3834632996973653146>

⁸ Struktura oblika diska u kojoj se difuzni materijal poput plina i prašine giba po orbitama oko nekog središnjeg objekta.