

O črnih luknjah in zvezdah, ki jih srečajo

Andreja Gomboc

Konec februarja je NASA objavila novico o tem, da so z rentgentskima satelitoma Chandra in XMM-Newton odkrili dokaze, da je v galaksiji RXJ1242.6-1119A središčna črna luknja raztrgala zvezdo. Kaj se je pravzaprav zgodilo?

Kaj so in kje najdemo črne luknje?

O zvezdah, ki bi imele tolikšno maso oz. bolje rečeno tako močno gravitacijo, da jim niti svetloba ne bi mogla uiti, sta prva razmišljala (in zapisala) Laplace in Michell konec 18. stoletja. Vendar so črne luknje na trdne teoretične temelje morale počakati na 20. stoletje in Einsteinovo splošno teorijo relativnosti. Kmalu po njeni objavi je Schwarzschild odkril rešitev Einsteinovih enačb polja, za katero se je izkazalo, da opisuje črno luknjo¹.

Pomemben korak sta leta 1939 naredila Oppenheimer in Snyder, ko sta pokazala, da je končno stanje zvezde odvisno od mase snovi, ki ostane v zvezdi. Če je te za manj kot okrog $1,2 M_S$ (kjer je M_S masa Sonca), zvezda konča kot bela pritlikavka. Če je ostane med $1,2 M_S$ in okrog $3 M_S$, nastane nevtronska zvezda. Če pa ostane v zvezdi več kot $3 M_S$, notranji tlak v zvezdi izgubi boj z gravitacijo in zvezda se neizbežno sesede v črno luknjo. Pravimo, da ta nastane v trenutku, ko se polmer zvezde zmanjša pod Schwarzschildov radij:

$$r_{\text{Sch}} = 2GM/c^2 \quad (1)$$

(kjer je M masa črne luknje, G gravitacijska konstanta in c svetlobna hitrost).

V 1960-tih se je začela zlata doba teoretičnega proučevanja črnih lukenj. Eno njenih največjih uspehov je bilo odkritje, da črna luknja zunanjemu opazovalcu ne razkriva nobenih svojih podrobnosti, kot npr. iz kakšne snovi ali antisnovi je nastala, ampak lahko od zunaj ugotovimo le tri njene lastnosti: maso, vrtilno količino in električni naboj.

Eksperimentalni dokazi o obstoju črnih lukenj so se začeli pojavljati v 1970-tih. Ker svetloba ne more pobegniti iz črne luknje, jo lahko opazimo le na podlagi vpliva, ki ga ima njeno gravitacijsko polje na okolico. Izkazalo se je, da je najboljši tak način opazovanje elektromagnetne energije (svetlobe v vseh možnih valovnih dolžinah), ki nastane ob tem, ko okoliška snov pada v črno luknjo.

Ena vrsta objektov, v katerih menimo, da opazimo ravno ta proces, so rentgentske dvojne zvezde. Kompaktna nevidna spremljevalka vleče nase plin z vidne zvezde. Ob tem se okrog kompaktne zvezde tvori disk plina, ki se lahko segreje do temperature nekaj milijonov stopinj in sveti v rentgentskem delu spektra. Iz parametrov tira dvojnega sistema (periode, nagnjenosti tira, hitrosti in mase vidne zvezde) lahko postavijo spodnjo mejo za maso nevidne spremljevalke. Če je ta krepko nad $3 M_S$, kolikor znaša meja za

¹ Schwarzschildova črna luknja se ne vrti in nima električnega naboja. Kasneje, leta 1963, je Kerr odkril rešitev, ki opisuje vrtečo črno luknjo in prav tako nima naboja. Reissner-Nordströmova rešitev opisuje nevrtečo a električno nabito črno luknjo, Kerr-Newmanove črne luknje pa se poleg naboja tudi vrtijo.

obstoj nevtronske zvezde, sklepajo, da gre za črno luknjo. Najbolj znani takšni dvojni sistemi, za katere so astronomi zatrdno prepričani, da gostijo črno luknjo, so Cyg X1, LMC X3 in A0620-00.

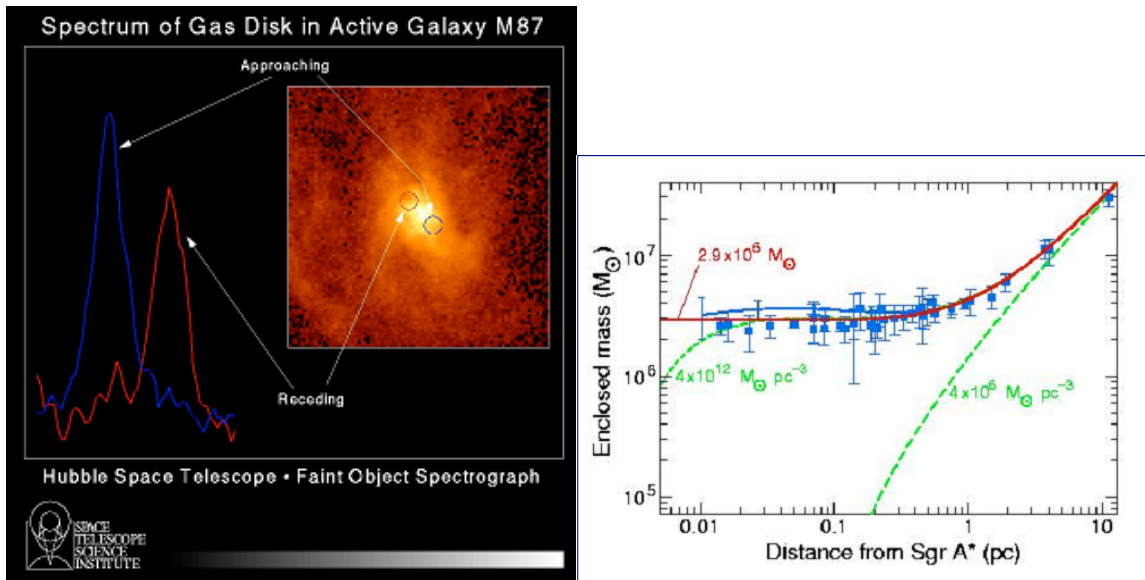
Druga vrsta objektov, v katerih dokazi kažejo na prisotnost črnih lukenj, so galaktična jedra. Opazovanja gibanja zvezd in plina v središčih večine galaksij (v grobem gre za Keplerske krožilne hitrosti $v = \sqrt{GM/r}$, ki povedo maso M znotraj radija r) namreč kažejo, da je v samem središču v izredno majhnem območju zbrane za od okrog milijona do nekaj milijard M_{\odot} mase. Supermasivna črna luknja je edina smiselna razlaga takšne koncentracije mase in lahko verjetno razloži tudi druge lastnosti teh jeder (npr. milijone svetlobnih let dolge curke snovi, ki izhajajo iz nekaterih galaktičnih jeder). Drugi modeli, npr. gosta kopica zvezd, kompaktnih objektov ipd., so med drugim zelo kratkoživi - zaradi pogostih medsebojnih trkov zvezd, bi se takšne kopice v nekaj milijonih let sesedle v črno luknjo. Žal je ločljivost današnjih instrumentov še zmeraj preslaba, da bi lahko neposredno razločili črno luknjo v središču neke galaksije.

Supermasivne črne luknje najdemo tako v večini aktivnih kot tudi neaktivnih galaksij. (Središča večine galaksij oziroma njihova jedra svetijo, kot bi pričakovali za gosto območje zvezd in plina. Pravimo jim tudi normalne oziroma neaktivne galaksije. Jedra okrog 10% galaksij pa svetijo veliko močnejše. Tem pravimo aktivna galaktična jedra (AGJ).) O aktivnih galaktičnih jedrih je bilo v Spiki že precej napisanega, zato samo na kratko: njihov izjemen sij po vsej verjetnosti prihaja iz akrecijskega diska, ki se tvori, ko okoliška snov (plin, prah) pada v črno luknjo. Ob tem se sprošča gravitacijska potencialna energija, snov pa se navija v zelo gosto spiralo, zaradi trenja, ki je lahko tudi magnetnega izvora, se segreva in oddaja ogromno energijo v obliki svetlobe. V neaktivnih galaktičnih jedrih pa črna luknja strada in sameva v temi - ker nima snovi v svoji bližini, ki bi izdajala njeno prisotnost, je praktično nevidna. Lahko pa se zgodi, da v njeno bližino zanese zvezdo...



Slika 1: Ilustracija modela AGJ s črno luknjo, v katero pada snov in pri tem tvori akrecijski disk in dva, v nasprotnih smereh izhajajoča curka snovi - levo: črna luknja ni vidna; desno: pogled od blizu.

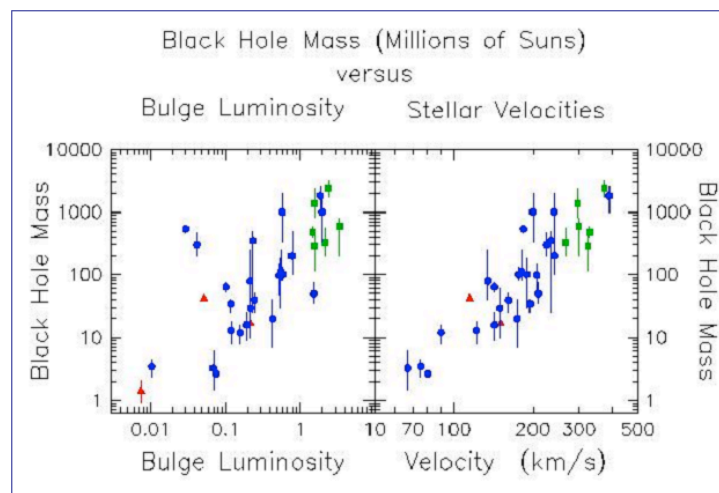
Vir: http://www.space.com/scienceastronomy/astronomy/our_black_hole_000920.html,
<http://www.xware.ru/db/msg/apod/2001-10-29>.



Slika 2: Levo: Dopplerjev spektralni premik črt razkriva hitrosti zvezd in plina v bližini središča galaksije M87, hitrosti pa povedo velikost mase okrog katere se zvezde in plini gibljejo. Desno: opazovanja te vrste kažejo, da masa s približevanjem središču naše Galaksije ne pada, ampak ostaja okrog tri milijone Sončevih mas.

Vir: <http://imgsrc.stsci.edu/op/pubinfo/gif/M87Plot.gif>,

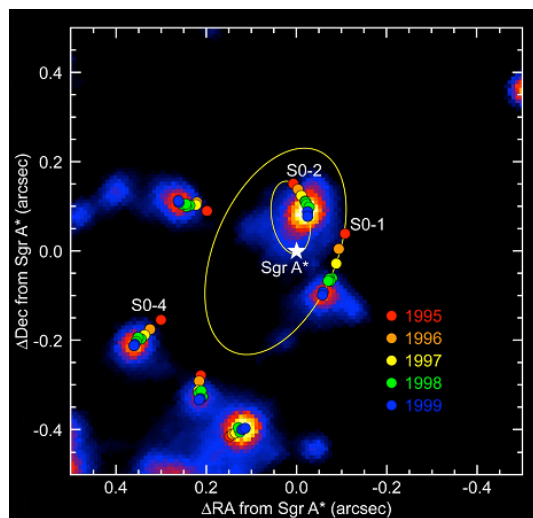
Kormendy J., <http://chandra.as.utexas.edu/~kormendy/stardate.html>.



Slika 3: Analize opazovanj 37 galaksij kažejo na dve zanimivi povezavi: da je masa črne luknje v središču galaksije približno sorazmerna z izsevom in posredno z maso

središčnega predela galaksije, in da je približno sorazmerna s povprečno hitrostjo zvezd v tem območju (pri tem ne gre za hitrost zvezd v neposredni bližini črne luknje, kjer njena masa dejansko vpliva na gibanje zvezd, ampak v širšem območju, kjer je vpliv mase črne luknje zanemarljiv v primerjavi z maso vidnih zvezd in plina). Vzrok teh povezav še ni znan, pove pa da so črne luknje v galaktičnih jedrih povezane z nastankom in razvojem galaksij. Vendar še ni znano, kako so te črne luknje nastale: ali so nastale kot že precej masivne črne luknje ob samem nastanku galaksije in so se potem počasi večale, ko so požirale okoliško snov, ali pa so nastale v razvoju galaksije iz majhnih črnih lukenj, ki so se sesedle v središču galaksije in potem začele hitro rasti ob intenzivnem črpanju plina in zvezd iz okolice. Nekatere razlage pravijo, da je njihov nastanek povezan z burnimi trki galaksij.

Vir: Kormendy J. <http://chandra.as.utexas.edu/~kormendy/bhsearch.html>.



Slika 4: Položaji in gibanje zvezd v neposredni bližini središča Galaksije, označenega z Sgr A*. Zvezda SO-2 ima orbitalno periodo 15,7 let in se približa domnevni črni luknji na okrog 2000 Schwarzschildovih radijev.

Tudi naša Galaksija ni izjema. Že nekaj let vemo, da v njenem središču domuje dokaj neaktivna črna luknja z maso okrog tri milijone M_{\odot} . Razburljivo odkritje pa je bilo objavljeno oktobra 2002 v reviji Nature. Gre za rezultate 10 letnih opazovanj središča naše galaksije s posebno metodo slikanja in spektroskopije v bližnji infrardeči svetlobi, ki omogoča zelo dobro kotno ločljivost. Z njo so opazili posamezne zvezde in 10 let beležili njihove položaje in gibanje. Tako so opazili zvezdo (slika 4), ki ima orbitalno periodo le 15,2 let in se je spomladi 2002 najbolj približala središču Galaksije: na le 17 svetlobnih ur, oz. dobrih sto razdalj Zemlje od Sonca. To je še zmeraj predaleč od domnevne črne luknje (okrog 2000 R_{Sch}), da bi črna luknja raztrgala ali posrkala zvezdo in predaleč, da bi v gravitacijskem polju in posledično v gibanju zvezde razločili podpis črne luknje (gravitacijsko polje črne luknje se začne bistveno razlikovati od Newtonove gravitacije GM/r šele, ko se črni luknji približate na manj kot 100 R_{Sch}). Vendar pa je dovolj blizu, da resno omejuje in izključuje vse druge modele galaktičnega jedra in predstavlja enega najtrdnjših dokazov za obstoj črne luknje v središču Galaksije.

Kaj se zgodi z zvezdo, ki se preveč približa črni luknji?

Odgovor na to vprašanje si lahko mislimo, da je "nič dobrega", bolj natančno pa je to odvisno od tipa zvezde, velikosti oz. mase črne luknje (ter tudi od njene vrtilne količine) in tega kako blizu črni luknji zvezdo zanese.

Po ocenah se v tipični galaksiji v $10^3 - 10^7$ letih ena zvezda (recimo z maso m_* in radijem r_*) približa črni luknji (z maso M) na manj kot znaša Rochev radij,

$$r_R = (M/m_*)^{1/3} r_* \quad (2).$$

Pa si nekoliko oglejmo ta Rochev radij: podobno kot pri lunah in planetih, tudi tukaj predstavlja oddaljenost od masivnega telesa (črne luknje), na kateri plimska sila, ki vleče telo narazen, postane primerljiva s silo, ki ga drži skupaj - v primeru plinaste zvezde je to lastna gravitacija. Če telo zaide krepko pod ta radij, ga plimska sila raztrga in popolnoma uniči. Enačba (2) pravi, da plimski vpliv črne luknje z višjo maso seže dalj, in sicer raste ta razdalja s potenco $1/3$. Vendar ne smemo pozabiti enačbe (1) in dejstva, da se velikost črne luknje tudi povečuje z njeno maso, in to sorazmerno. Tako pridemo po kratkem sklepanju do ugotovitve, da zelo masivnih črnih lukenj sploh ne bomo videli raztrgati zvezdo: njihov Rochev radij bo namreč ležal znotraj črne luknje in takšna črna luknja bo zvezdo, ki se ji preveč približa, kar celo potegnila pod svoj horizont in jo šele v notranjosti popolnoma raztegnila in uničila. Če je zvezda tipa Sonca, mora biti masa črne luknje okrog sto milijonov mas Sonca ali več, da leži Rochev radij znotraj črne luknje (za zvezde gostejše od Sonca je ta meja nižja, za redkejše pa višja). Če pa je masa črne luknje med sto tisoč in nekaj deset milijoni Sončevih mas, bo Rochev radij za Soncu podobno zvezdo ležal dokaj blizu a izven črne luknje. Kmalu zatem, ko ga zvezda prečka in se približuje črni luknji, začne čutiti naraščajočo plimsko silo - kako zvezda konča je v tem primeru odvisno od tega, kako blizu črni luknji jo njen tir zanese:

a) če zvezda prileti "čelno", jo bo nekoliko raztegnilo, nato pa bodo več ali manj vsi njeni deli izginili za obzorjem črne luknje,

b) če zvezda črno luknjo le bežno "oplazi", jo plimska sila deformira - kako močno, je odvisno od tega kako blizu črni luknji je prišla. Iz majhnih deformacij si zvezda, ko je spet daleč v stran od črne luknje, še lahko opomore, pri večjih, ko jo raztegne v polmesecu podobno obliko, pa ne. Samo jedro zvezde morda preživi, ostanki zunanjih plasti pa se razpršijo po okolici.

c) najbolj zanimivo pa je dogajanje, če zvezda prileti glede na črno luknjo po ravno ta pravem tiru oz. iz pravšnje smeri, tako da se črni luknji zelo približa, ne pade pa direktno vanjo. V tem primeru črna luknja zvezdo dobesedno raztrga. Deli zvezde padejo v črno luknjo, ostanki pa se razpršijo po okolici. Kolikšen je delež enih in drugih je seveda odvisno od tira, pa tudi od lastnosti zvezde.



Tipično traja celotno srečanje zvezde Sončevega tipa s črno luknjo, od prečkanja Rochevega radija do raztrganja zvezde, le nekaj ur! Ob tem se odvisno od stopnje deformacije in raztrganja sprosti notranja energija zvezde, razkrije se lahko vroče jedro zvezde in rezultat je nenadno povečanje sija takšne zvezde. Kako dolgo ta povečan sij traja, je odvisno od številnih dejavnikov in zaenkrat še ni natančno znano. Eden od omejevalnih faktorjev je vsekakor zaloga energije v zvedu - slej ko prej bo te zmanjkalo in zvezda bo ugasnila.

Del razbitin zvezde, ki so razpršene po okolici, se lahko po nekaj obhodih orbite postopoma začne vračati proti črni luknji. Nastane lahko oblak oz. disk plina, ki, (podobno kot v aktivnih galaktičnih jedrih) po spirali pada globlje in globlje v potencialno jamo okrog črne luknje. Ob tem se segreva in sveti, notranji deli, ki so črni luknji najbližje, tudi v rentgenskih valovnih dolžinah. Postopoma črna luknja posrka tudi ta disk - po ocenah lahko to traja nekaj mesecev ali celo let. Ko tega plina zmanjka, območje okrog črne luknje ugasne in črna luknja spet sameva v temi. In čaka na naslednjo žrtev...

Kaj so videli v RXJ1242.6-1119A?

V članku, ki je bil podlaga v začetku omenjene novice, skupina astronomov z Instituta Max Planck v Garchingu v Nemčiji, Kolumbijske univerze v ZDA in XMM-Newton znanstveno-operacijskega centra v Španiji, poroča o opazovanjih galaksije RXJ1242.6-1119A v ozvezdju Device. Galaksijo so opazovali decembra 1990 in januarja 1991 in pri tem v njenem središču niso opazili nobenega izvora, kar se je ujemalo z njeno kvalifikacijo med neaktivna galaktična jedra. Poleti 1992 so s satelitom ROSAT opazili v njenem središču svetel rentgenski izvor. V kasnejših letih so z opazovanji s satelitoma Chandra in XMM Newton ugotovili, da izvor ugaša (njegov sij se je do l. 2001 zmanjšal za faktor 200), kot bi pričakovali od oblaka prahu, ki ga postopoma požira črna luknja. Ob izključitvi drugih možnih razlag (kot je npr. da gre za izjemno spremenljivo aktivno galaktično jedro), astronomi zaključujejo, da se potek dogodka ujema s tem kar pričakujejo, da se zgodi z ostanki zvezde, ki jo raztrga črna luknja. Točen datum, kdaj naj bi do ključnega dogodka prišlo, ni znan - ocenjujejo, da nekje med začetkom leta 1991 in sredino 1992. Ker dogodka žal niso ujeli v fazi samega raztrganja zvezde, ki je prikazana

na simuliranih slikah tu, zaenkrat ni mogoče preveriti natančnega ujemanja numeričnih simulacij z realnostjo. Morda prihodnjič...