

Črne luknje – od prve zamisli do Nobelove nagrade

Andreja Gomboc

Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2020 so dobili trije znanstveniki, ki so pomembno prispevali k razumevanju najbolj skrivnostnih teles v vesolju – črnih lukenj. Polovico nagrade je prejel Roger Penrose, ki je teoretično pokazal, da so črne luknje neposredna posledica Einsteinove splošne teorije relativnosti. Drugo polovico sta si razdelila Andrea Ghez in Reinhard Genzel, ki sta s svojima raziskovalnima skupinama opazovala gibanje zvezd v neposredni bližini središča naše Galaksije in dokazala, da se v njem skriva masivno telo, ki je tako kompaktno oziroma majhno, da je po današnjem razumevanju lahko le supermasivna črna luknja.

Črne luknje so deli vesolja, v katerih je gravitacijski privlak tako močan, da iz njega ne more pobegniti nič, niti svetloba ne. Omejuje jih tako imenovano obzorje dogodkov, znotraj katerega bi bila ubežna hitrost višja

od svetlobne hitrosti v praznem prostoru, ki znaša približno 300.000 kilometrov na sekundo. Ker nič ne more potovati hitreje od svetlobe, to pomeni, da iz tega območja ne moreta priti ne snov in ne svetloba. Iz njega tako ne moremo dobiti nobene informacije o tem, kaj se dogaja v notranjosti (kakšna je snov, temperatura in podobno). Črne luknje svoje skrivnosti res zelo dobro čuvajo. Od zunaj lahko iz lastnosti prostor-časa v bližini črne luknje ugotovimo le njeno maso, vrtilno količino in nabojo.

Od prve zamisli ...

Prava teorija za opis črnih lukenj je Einsteinova splošna teorija relativnosti, ki je bila objavljena novembra leta 1915. Prve zabeležene zamisli o telesih, ki bi bila tako masivna, da bi postala nevidna, saj svetloba ne bi mogla zapustiti njihovega površja, pa so dobro stoletje starejše.



*Sir Roger Penrose (1931-),
britanski matematični fizik,
matematik in filozof znanosti.*



*Reinhard Genzel (1952-),
nemški astrofizik.*



*Andrea Mia Ghez (1965-),
ameriška astrofizikarka.*

Vir: <https://physicsworld.com/a/roger-penrose-reinhard-genzel-and-andrea-ghez-bag-the-nobel-prize-for-physics>.

Foto: IOP Publishing. Tushna Commissariat; CC-BY-SA H Garching; UCLA. Christopher Dibble.

Angleški astronom in duhovnik John Michell je v *Philosophical Transactions of the Royal Society (Filozofskih poročilih Kraljeve družbe)* leta 1783 pisal, da bi zvezde, ki bi imele enako gostoto kot Sonce, a petstokrat večji polmer, imele tako močan gravitacijski privlak, da jim svetloba ne bi mogla uiti. Francoski učenjak Pierre Simon de Laplace je leta 1796 v *Exposition du Système du Monde (Razlagi sistema sveta)* neodvisno od Michella prišel do podobnega zaključka in leta 1799 v *Allgemeine Geographische Ephemeride (Splošnih geografskih efemeridah)* matematično pokazal, da bi se to zgodilo z zvezdo s tako povprečno gostoto, kot jo ima Zemlja (štirikrat višjo od Sonca) in s polmerom, ki bi bil dvestopetdesetkratnik Sončevega polmera. Torej, sta sklepala, bi lahko bile najmasivnejše zvezde pravzaprav »nevidne« ali »temne zvezde«. Danes vemo, da take zvezde (z maso več deset milijonov ali celo čez sto milijonov mas Sonca) ne obstajajo (zgornja meja za obstoj zvezd je okrog stopetdeset mas Sonca), obstajajo pa črne luknje s tolikšno maso, ki jih uvrščamo med supermasivne črne luknje.

Michell in Laplace sta pri svojih izračunih uporabila Newtonovo mehaniko. Z njo lahko hitro izračunamo razdaljo od mase M , s katere telo z maso m potrebuje svetlobno hitrost c , da uide gravitacijskemu privlaku mase M : telo m postavimo na parabolično tirnico oziroma izenačimo velikost njegove kinetične in gravitacijske energije, poračunamo in ugotovimo, da je ta razdalja dana z izrazom $r = 2GM/c^2$ (kjer je G gravitacijska konstanta). Danes vemo, da ta postopek izračuna ni pravilen, saj bi morali namesto Newtonove mehanike uporabiti splošno teorijo relativnosti in upoštevati, da delci svetlobe (fotoni) nimajo mase. A rezultat, ki smo ga dobili, je pravilen in enak kot v splošni teoriji relativnosti. Tej razdalji, ki določa obzorje dogodkov črne luknje, pravimo Schwarzschildov polmer (in ga bomo v nadaljevanju označili z R_{Sch}). Ime je dobil po Karlu Schwarzschildu, ki je januarja

leta 1916, le dva meseca po objavi splošne teorije relativnosti, našel rešitev Einsteinovih enačb polja, ki je opisovala ukrivljenost prostor-časa v okolici krogelno simetrične, nevrtče se mase. Ta rešitev je imela dve posebni, zagonetni točki: $r = 0$ in $r = R_{Sch}$, v katerih je del rešitve postal nič ali pa neskončno velik. Pomen teh dveh točk je vrsto let begal znanstvenike, dokler niso ugotovili, da je tako imenovana Schwarzschildova singularnost pri $r = R_{Sch}$ odvisna od izbire koordinatnega sistema in ni prava singularnost, v kateri bi se zgodilo kaj čudnega, kar bi postavljalo pod vprašaj veljavnost znanih fizikalnih zakonov. Nasprotno so za točko $r = 0$ ugotovili, da je prava singularnost, v kateri opis z znanimi zakoni odpove.

Da ima takšna matematična rešitev tudi fizikalni pomen – da bi takšna telesa lahko zares obstajala –, sta prva predlagala Robert Oppenheimer in Hartland Snyder leta 1939. Preučevala sta končna stanja masivnih zvezd in ugotovila, da se sredica masivne zvezde, ki je porabila svoje jedrsko gorivo, prične zaradi lastne gravitacije krčiti. Ko se skrči pod Schwarzschildov polmer, se odreže od preostalega dela vesolja in nastane črna luknja. Ker krčenja nič ne more ustaviti, se nadaljuje še naprej, vse dokler ni vsa snov zbrana v točki $r = 0$ – v točki s prostornino nič in posledično z neskončno gostoto –, točki singularnosti.

Ključni privzetek, ki je poenostavil njune izračune, je bila krogelna simetrija. A zvezde niso povsem krogelno simetrične, saj se vrtijo okoli svoje osi, njihovo simetrijo pa lahko pokvari še kaj drugega. Zato so bili mnogi fiziki mnenja, da je končno stanje kolapsa realnih zvezd drugačno. Morda se v nesimetričnem primeru snov ne sesede v eno samo točko in ne ustvari singularnosti v središču. Vse do šestdesetih let dvajsetega stoletja so zato mislili, da so te matematične rešitve zgolj teoretični opis idealnega, krogelno simetričnega primera, kakršen v vesolju ne obstaja.

Črne luknje so robustna napoved splošne teorije relativnosti

Pomemben korak na poti odkrivanja črnih lukenj je bila določitev oddaljenosti kvazarjev – izvorov radijske svetlobe, ki so bili videti točkasti, njihova oddaljenost in narava pa sta bili velika uganka.

Leta 1963 je Maarten Schmidt s pomočjo kozmološkega rdečega premika spektralnih črt¹ kvazarja z oznako 3C 273 izmeril njegovo oddaljenost – nekaj milijard svetlobnih let od nas. Podobno velike razdalje so kmalu zatem izmerili tudi za druge kvazarje. Iz njihovega navideznega sija na našem nebu in znane oddaljenosti so lahko izračunali njihov izsev. Ugotovili so, da iz zelo majhnega območja kvazarja (v nekaterih kvazarjih velikega le nekaj svetlobnih ur ali dni) lahko prihaja izsev, ki je primerljiv z izsevom vseh zvezd v več sto običajnih galaksijah skupaj (vsaka od njih sestavljena iz več sto milijard zvezd). Kot možen vir te ogromne energije so predlagali gravitacijsko energijo, ki se sprosti ob sesedanju telesa na velikost Schwarzschildovega polmera. (Današnji model kvazarjev in drugih vrst aktivnih galaktičnih jeder opiše njihove opazovane lastnosti s supermasivno črno luknjo, ki požira snov – ogromna količina energije prihaja od snovi, ki pada proti črni luknji, se zbira v disk okoli nje in izgublja gravitacijsko energijo, ta pa se pretvori v toploto in svetlobo.)

Schmidtova določitev oddaljenosti kvazarjev je spodbudila Rogerja Penrosa, da je razmišljal o tem, ali lahko črne luknje nastanejo tudi v realističnih, nesimetričnih primerih. V tem času je bilo že sprejeto, da dovolj velika in krogelno simetrična masa ob kolapsu ne doseže ravnovesnega stanja in se krči vse do fizikalne singularnosti pri $r = 0$. Prav tako so vedeli, da ko se telo se-

veda skozi svoj Schwarzschildov polmer, lokalni opazovalec, ki se giblje skupaj s površjem telesa, ne opazi nič posebnega. To niti ni presenetljivo, saj se za dovolj velike mase to zgodi pri gostotah, ki niso zelo visoke (če se spomnimo »temnih zvezd« Michella in Laplacea, so imele gostoti enaki gostoti Sonca oziroma Zemlje). Drugače je za zunanjega opazovalca, za katerega je videti, kot da sesedanje telesa proti Schwarzschildovemu polmeru traja neskončno dolgo (in nikoli ne vidi, da bi se telo skrčilo pod ta polmer, saj ne more videti v črno luknjo).

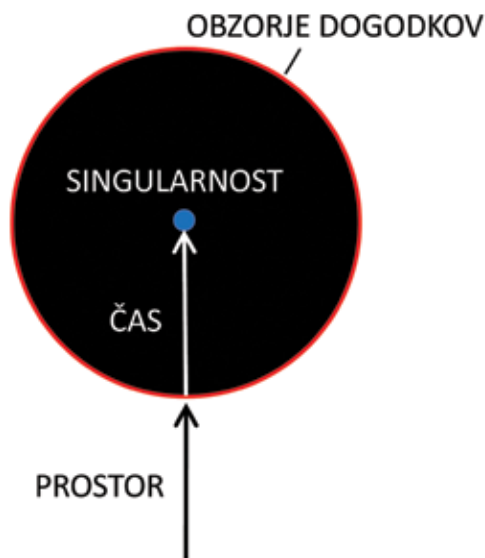
V notranjosti črne luknje pa nastane težava s singularnostjo pri $r = 0$ in z njenim fizikalnim opisom. Ali je ta singularnost le posledica privzete simetrije ali nastane tudi v primerih, ki nimajo nikakršne simetrije?

Odgovor oziroma orodje na poti do njega se je Rogerju Penroseu utrnil jeseni leta 1964 med sprehodom. Razvil je posebno matematično metodo, imenovano »ujeta površina« – to je zaprta dvodimenzionalna površina, ki ima lastnost, da vsi svetlobni žarki, ki so pravokotni nanjo, konvergirajo/se stikajo v prihodnosti. Za primerjavo, površje krogle v ravnem prostoru ni takšno: žarki, ki gredo vanj, konvergirajo, žarki, ki prihajajo iz nje, pa divergirajo/se razhajajo. Od ujete površine pa vsi žarki (v vse smeri) konvergirajo. Takšne ujete površine so posledica močne gravitacije in so v primeru krogelno simetrične mase površja krogel, ki imajo polmer, manjši od Schwarzschildovega. Vsi svetlobni žarki skozi nje kažejo proti središču.

Posledica ujete površine je, da tok časa neizogibno prinese opazovalca, ki je prečkal obzorje dogodkov, v končnem času v središče $r = 0$, kjer se čas konča. Iz Schwarzschildove rešitve namreč sledi, da se ob prečkanju obzorja dogodkov vlogi časovne in radialne koordinate zamenjata – smer proti središču postane smer toka časa (slika 2). Zato je tako težko oziroma nemogoče priti iz notranjosti črne luknje, kot je nemogoče potovati nazaj v času.

Roger Penrose je pokazal, da je ujete po-

¹ Zaradi širjenja vesolja se valovna dolžina svetlobe v času potovanja od izvora do opazovalca raztegne za enak faktor, kot se v tem času razširi vesolje. Valovna dolžina svetlobe se poveča ali se, kot pogosto rečemo, premakne proti rdečemu delu spektra. Dlje ko je izvor od opazovalca, dlje časa potuje svetloba in večji je premik.



Slika 2: Shematski diagram notranjosti črne luknje. Znotraj obzorja dogodkov se spremeni pomen radialne koordinate. Čas se konča v točki singularnosti. Vir: The Nobel Committee for Physics: Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2020. Theoretical foundation for black holes and the supermassive compact object at the Galactic centre.

vršine mogoče najti tudi v splošnem, nesimetričnem primeru in da njihov obstoj ni odvisen od predpostavke, da obstaja neka vrsta simetrije. Pokazal je tudi, da ko enkrat nastane ujeta površina, v njej neizogibno nastane tudi točka singularnosti. Njen nastanek je robustna in neizogibna posledica oziroma napoved splošne teorije relativnosti.

Supermasivna črna luknja v središču naše Galaksije

Drugi del Nobelove nagrade sta dobila Andrea Ghez in Reinhard Genzel za odkritje masivnega, kompaktnega telesa v središču naše Galaksije.

Supermasivne črne luknje, z masami od sto tisoč do deset milijard mas Sonca, se ne nahajajo samo v središčih kvazarjev in drugih vrst aktivnih galaksij, v katerih požirajo snov. V mnogih, če ne celo v vseh velikih

galaksijah se v središču skrivajo supermasivne črne luknje, ki v veliki večini galaksij okoli sebe nimajo diska snovi, ki bi močno svetil. Tem pravimo, da so »lačne« ali »speče« črne luknje, in njihovim galaksijam, da so normalne ali neaktivne. Prisotnost velike mase v njihovih središčih izdaja gibanje plina in zvezd v njihovi bližini.

A kako lahko dokažemo, da je ta masa v središču črna luknja in ne kaj drugega? Črne luknje, tudi supermasivne, so v astronomskem merilu zelo majčkene objekti: na primer, črna luknja z maso milijon Sončevih mas ima polmer, ki je le štirikrat večji od polmera Sonca oziroma je le dva odstotka Zemljine oddaljenosti od Sonca; črna luknja z milijardo mas Sonca ima polmer, ki je enak oddaljenosti Urana od Sonca. Največje znane supermasivne črne luknje so torej primerljive z velikostjo Osončja (nekaj svetlobnih ur), kar je majčkeno v primerjavi z velikostjo galaksij (naša Galaksija ima premer sto tisoč svetlobnih let) in razdaljami med njimi.

Za neposredni dokaz, da je masa v središču neke druge galaksije črna luknja in ne, na primer, zelo gosta kopica zvezd, bi potrebovali instrumente z zelo dobro kotno ločljivostjo, s katerimi bi na oddaljenosti več milijonov ali celo milijard svetlobnih let razločili podrobnosti na razdaljah velikega reda Schwarzschildovega polmera. Edini primer doslej, ko so uspeli posneti sliko diska snovi v neposredni okolici črne luknje, je radijski posnetek središča aktivne galaksije M 87, ki je aprila leta 2019 obšel svet. Dosežena kotna ločljivost v tem primeru je podobna tisti, ki bi jo morali imeti, da bi, sedeč v Evropi, brali časopis v New Yorku.

Oči radovednih znanstvenikov so se obrnile proti najbližjemu galaktičnemu centru – središču naše Galaksije. To je »samo« okrog petindvajset tisoč svetlobnih let daleč od nas. V središču je radijski izvor z oznako Sgr A* in okrog njega nekaj svetlobnih let velika kopica zvezd in plina. Njihovo giba-

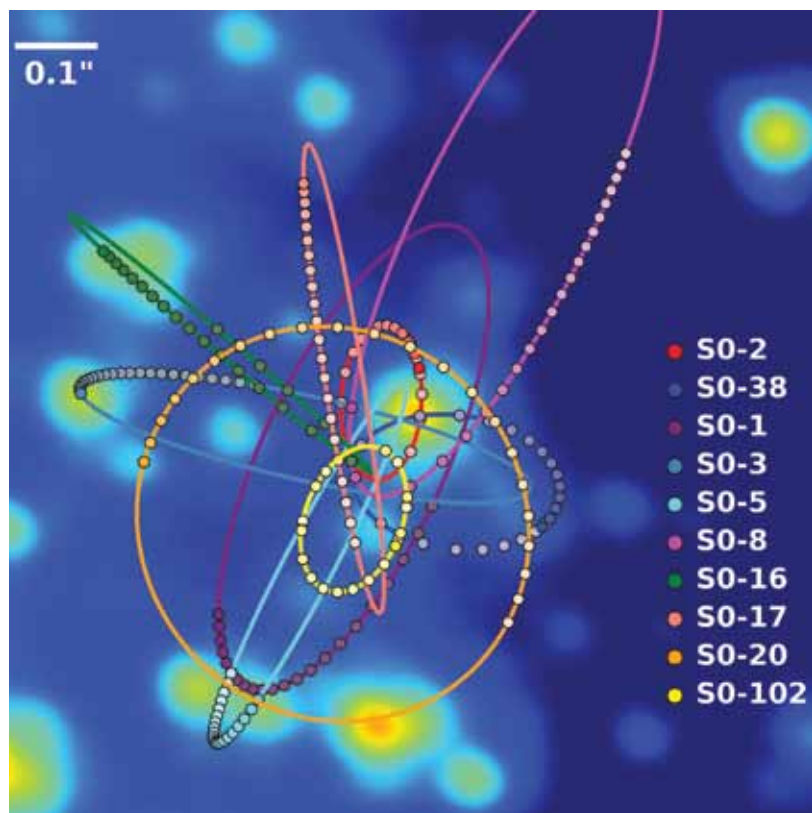
nje razkriva gravitacijski potencial v središču in s tem porazdelitev mase v njem. Če je masa zbrana v enem samem, majhnem objektu – črni luknji –, potem so hitrosti zvezd, ki se nahajajo na različnih razdaljah r od središča, obratno sorazmerne s kvadratnim korenem razdalje r , podobno kot se, na primer, spreminjajo obhodne hitrosti planetov z razdaljo od Sonca. Če pa je masa porazdeljena po širšem delu prostora, potem hitrosti zvezd z razdaljo r padajo počasneje ali celo naraščajo.

Da bi razvozlala skrivnost središča Galaksije, sta se v devetdesetih letih dvajsetega stoletja Andrea Ghez in Reinhard Genzel s svojima raziskovalnima skupinama lotila opazovanja gibanja zvezd v njem. Skupina Andree Ghez je uporabila teleskope na observatoriju na Havajih, skupina Reinharda Genzela teleskope Evropskega južnega ob-

servatorija v Čilu. Ker je zaradi ekstinkcije (oslabitve) vidne svetlobe v plinu in prahu, ki se nahajata v disku Galaksije, njeno središče v vidni svetlobi »zakrito« pred našim pogledom, so se odločili za opazovanja v infrardeči svetlobi, ki lahko prodre tudi skozi snov v galaktičnem disku.

Glavni izziv je bilo doseči dovolj dobro kotno ločljivost oziroma dovolj »oster pogled«, da so lahko kar se da natančno določili položaje posameznih zvezd ter nato, s ponavljanjem opazovanj čez vrsto let, izmerili spremembe njihovih položajev in s tem gibanje.

Da so lahko odpravili vpliv turbulenc v Zemljinem ozračju, ki povzročijo navidezno migotanje zvezd in poslabšajo ločljivost posnetkov, so v zgodnjih opazovanjih uporabili posebno tehniko, s katero posnamejo zelo kratke posnetke (s časom osvetlitve de-



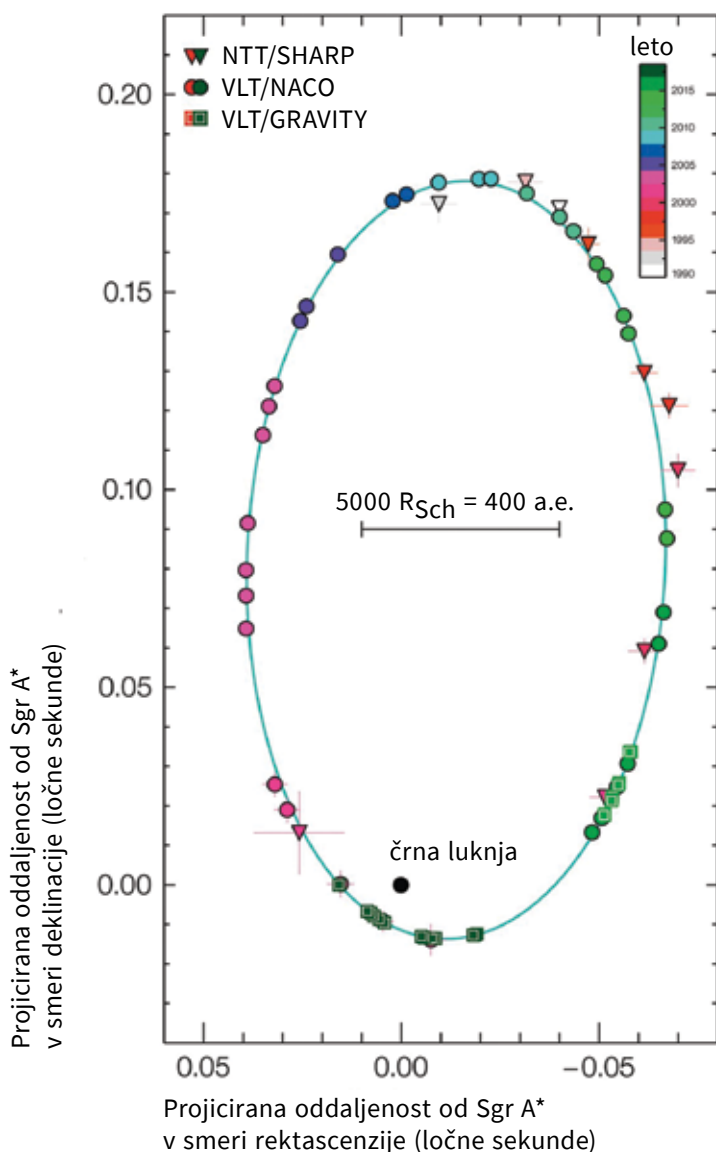
Slika 3: Tirnice zvezd v bližini središča naše Galaksije v obdobju 1995 do 2016, kot jih je izmerila skupina Andree Ghez. Rdeča črta označuje tirnico zvezde S0-2 oziroma S2. Vir: Keck/UCLA Galactic Center Group.

setinko sekunde), jih med seboj poravnajo, tako da se vzorci zvezd »ujamejo«, jih seštejejo in tako dobijo ostrejšo sliko. Ugotovili so, da so izmerjene hitrosti zvezd obratno sorazmerne s kvadratnim korenom razdalje zvezd od središča Galaksije, točno tako, kot bi pričakovali, če se v njem skriva le eno samo, majhno telo. S to tehniko so se središču

Galaksije uspeli približati na približno dvanajst svetlobnih dni.

V novem tisočletju so pričeli na obeh observatorijih uporabljati prilagodljivo optiko. Pri tej tehniki z laserjem visoko v ozračju ustvarijo na nebu, v bližini objekta opazovanja, umetno zvezdo. Nato opazujejo oba – umetno zvezdo in objekt opazovanja – ter

Slika 4: Tirnica zvezde S2 okoli središča naše Galaksije, kot so jo določili na podlagi petindvajset let opazovanj s teleskopi Evropskega južnega observatorija v Čilu. Oznake (trikotniki, krogi, kvadrati) označujejo položaj zvezde izmerjen z različnimi instrumenti (SHARP na teleskopu New Technology Telescope – NTT, NACO in GRAVITY na Zelo velikem teleskopu (Very Large Telescope – VLT)). Barva oznake označuje leto meritve položaja. Daljica v notranjosti tirnice prikazuje razdaljo $5.000 R_{\text{Sch}}$ oziroma 400 razdalj Zemlja–Sonce. (Velikosti zvezde in črne luknje nista v pravilnem razmerju z razdaljami). Vir: ESO/MPE/ GRAVITY Collaboration.



s hitrim spreminjanjem oblike zrcala v teleskopu v realnem času kompenzirajo popačitve slike, ki nastanejo zaradi turbulenc v ozračju, in poskušajo doseči čim ostrejšo sliko umetne zvezde. S tem izostrijo oziroma odpravijo migotanje zaradi ozračja tudi pri sliki opazovanega objekta. Ta tehnika omogoča ostrejšo sliko in tudi daljše čase osvetlitve ter s tem opazovanje šibkejših zvezd.

Uporaba prilagodljive optike je obe skupini pripeljala še bližje središču Galaksije. Slika 3 prikazuje gibanje zvezd v območju približno en svetlobni mesec okoli središča. Med njimi je posebej zanimiva zvezda z oznako S2 oziroma S0-2: središče Galaksije obkroži v samo šestnajstih letih (za primerjavo, Sonce potrebuje več kot dvesto milijonov let za en obhod), giblje se po zelo sploščeni eliptični tirnici in se Sgr A* približa na zgolj sedemnajst svetlobnih ur.

Rezultati obeh raziskovalnih skupin so se odlično ujemali. Pokazali so, da se v središču Galaksije nahaja masa za približno štiri milijone mas Sonca. Ta masa je zelo zgoščena, saj se nahaja znotraj tirnice zvezde S2 – znotraj območja s polmerom, ki je le približno stopetindvajsetkratnik Zemljine razdalje od Sonca. Prispevek zvezd in ostankov zvezd k tej masi je zanemarljiv, torej gre za zelo kompaktno telo. Nabolj znanstveno

smiselna in trdna razlaga je, da je ta kompakten objekt v središču Galaksije supermasivna črna luknja.

Obe raziskovalni skupini še naprej budno spremljata dogajanje v središču Galaksije. Posebej natančno so spremljali zvezdo S2, ko je maja leta 2018 potovala skozi pericenter – točko na svoji tirnici, v kateri se najbolj približa Sgr A* (slika 4).

Ob tem »mimoletu« jim je uspelo izmeriti precesijo njenega pericentra oziroma sukanje eliptične tirnice zvezde okoli črne luknje in gravitacijski rdeči premik, ki sta bila povsem v skladu z napovedmi Einsteinove splošne teorije relativnosti – teorije, ki je v sto letih obstoja uspešno prestala številne preizkuse. Še ena njena napoved – gravitacijski valovi – nam od prve neposredne detekcije leta 2015 (nagrajene z Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2017) odpira novo okno v vesolje in nam pomaga razkrivati skrivnosti črnih lukenj na povsem nov način.