

NOBELOVA NAGRADA ZA FIZIKO 2020 – ČRNE LUKNJE

ANDREJA GOMBOC

Fakulteta za naravoslovje, Center za astrofiziko in kozmologijo
Univerza v Novi Gorici

Ključne besede: astronomija, črne luknje, Nobelova nagrada za fiziko

Nobelovo nagrado za fiziko so leta 2020 podelili znanstvenici in dvema znanstvenikom za njihova odkritja o črnih luknjah. Roger Penrose je pokazal, da opis črnih lukenj sledi neposredno iz splošne teorije relativnosti. Andrea Ghez in Reinhard Genzel sta s svojima raziskovalnima skupinama opazovala gibanje zvezd v neposredni bližini središča naše Galaksije in dokazala, da se v njem skriva majhno in masivno telo, ki je lahko le supermasivna črna luknja.

NOBEL PRIZE FOR PHYSICS 2020 – BLACK HOLES

Nobel prize for physics in 2020 was awarded to three scientists, for their discoveries about black holes. Roger Penrose showed that black holes are a direct consequence of the general theory of relativity. Andrea Ghez and Reinhard Genzel discovered that an extremely heavy object governs the stars' orbits at the centre of our Galaxy. A supermassive black hole is the only currently known explanation.

Uvod

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. Podoben, a krajši prispevek je izšel tudi v reviji *Proteus* [9].

Roger Penrose je s pronicljivimi matematičnimi metodami pokazal, da opis črnih lukenj sledi neposredno iz splošne teorije relativnosti. Črne luknje so tako goste, da iz njih ne more uiti niti svetloba. Penrose je leta 1965 pokazal, da črne luknje dejansko lahko nastanejo, in podrobno opisal njihove lastnosti. V svoji notranjosti skrivajo singularnost, za opis katere ne moremo uporabljati znanih zakonov fizike. Njegov prelomni članek še vedno velja za enega od najpomembnejših prispevkov k razvoju splošne teorije relativnosti.

Reinhard Genzel in Andrea Ghez sta vodila vsak svojo skupino astronomov, ki se je že od začetka devetdesetih let osredotočala na opazovanje



Slika 1. Britanski matematični fizik, matematik in filozof znanosti Sir Roger Penrose (1931–), nemški astrofizik Reinhard Genzel (1952–) in ameriška astrofizičarka Andrea Mia Ghez (1965–) so prejemniki Nobelove nagrade za fiziko za leto 2020. Vir fotografij: IOP Publishing; Tushna Commissariat, CC-BY-SA H Garching; UCLA, Christopher Dibble.

središča Galaksije, ki se nahaja v ozvezdju Strelec. Zelo natančno so izmerili orbite najsvetlejših zvezd na tem območju in obe skupini sta odkrili zelo masivno, nevidno telo, okoli katerega se gibljejo. Masa tega telesa je štiri milijone Sončevih mas, obsega pa območje manjše od Osončja. Genzel in Ghez sta razvila metode natančnega opazovanja skozi medzvezdni plin in prah z največjimi teleskopi. Na robu tehnoloških zmožnosti s prefinjenimi tehnikami, s katerimi se zmanjšujejo učinki popačitve Zemljinega ozračja, sta s posebnimi instrumenti izvedla dolgotrajne raziskave, ki so nam dale do takrat najbolj prepričljiv dokaz o obstoju supermasivne črne luknje v središču Galaksije.

Sir Roger Penrose je angleški matematični fizik, zaslužni profesor matematike na Univerzi v Oxfordu. Doktoriral je leta 1958 v Cambridgeu. Reinhard Genzel je nemški astrofizik, sodirektor Inštituta Max Planck za zunajzemeljsko fiziko, profesor na Univerzi Ludwiga Maximilliana v Münchnu in zaslužni profesor Univerze v Kaliforniji v Berkeleyu. Doktoriral je leta 1978 na Univerzi v Bonnu. Andrea Ghez je doktorirala na Kalifornijskem inštitutu za tehnologijo leta 1992. Od 1994 dela na Univerzi v Kaliforniji v Los Angelesu, kjer je profesorica za fiziko in astronomijo in vodi tamkajšnje skupine za raziskave središča naše Galaksije.

Andrea Ghez je prva astronomka in četrta ženska, ki je dobila Nobelovo nagrado za fiziko (od skupno 222 prejemnikov do 2020). Kar je dosegla, veliko pove o njej; to, da je bila prva oziroma četrta, pove več o sistemu. Ob prejemu nagrade je Andrea Ghez izjavila: »Zame je bilo vedno zelo pomembno spodbujati mlade ženske za znanost, zato mi Nobelova nagrada

pomeni priložnost in odgovornost, da spodbujam naslednjo generacijo znanstvenic, ki so navdušene nad tovrstnim delom. Pomembno je imeti vzornice. Mislim, da ko vidiš osebe, ki so ti podobne, ali osebe, ki so drugačne od večine, da so uspešne, ti to kaže, da obstaja možnost, da lahko tudi ti to storiš, da je to področje odprto tudi zate. Pogosto je težko početi stvari, ki so drugačne, in če si še ti drugačna, obstaja priložnost, če imaš samozavest, da počneš stvari, ki so resnično drugačne. Imela sem srečo, da sem imela starše, učitelje in mentorje, ki so me zelo podpirali pri mojih zanimanjih. Na vsaki stopnji pa se je vedno našel kdo, ki je rekel ne, tega ne moreš narediti, ker si dekle. Zato sem se navadila ignorirati, ko so mi ljudje rekli, da nečesa ne morem narediti. Bili so trenutki, ko ljudje niso verjeli, da bodo naši pristopi delovali. A do takrat sem bila že precej dobro natrenirana v tem, da sem verjela vase.« [19]

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 električni naboj.

Prava teorija za opis črnih lukenj je Einsteinova splošna teorija relativnosti, ki je bila objavljena novembra leta 1915 in jo opiše na prvi pogled preprosta enačba

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu},$$

v kateri so $G_{\mu\nu}$ Einsteinov tenzor, $g_{\mu\nu}$ metrični tenzor, Λ kozmološka konstanta, $T_{\mu\nu}$ tenzor posplošene napetosti, G gravitacijska konstanta in c hitrost svetlobe v vakuumu. Podrobnejša obravnava enačbe in členov v njej je v [13]. Prve zabeležene zamisli o telesih, imenovanih tudi »temne zvezde«, ki bi bila tako masivna, da bi postala nevidna, saj svetloba ne bi mogla zapustiti njihovega površja, pa sta razvila Michell in Laplace dobro stoletje pred tem [10–12]. Tako preprosta ideja sovпада s prvo natančno rešitvijo Einsteinove enačbe. Ta rešitev, ki jo je leta 1916 predlagal Schwarzschild [17], opisuje gravitacijsko polje v prostoru okoli sferično simetrično porazdeljene mase brez električnega naboja in vrtilne količine za primer, ko je kozmološka konstanta enaka nič. V rešitvi nastopa umeritveni parameter $r_s = \frac{2GM}{c^2}$, ki ga imenujemo Schwarzschildov polmer in predstavlja oddaljenost obzorja dogodkov, razdaljo, na kateri je ubežna hitrost okoli telesa z maso M enaka svetlobni hitrosti.

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 [16]. 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 [17]. (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 seseda 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 gostote enake gostoti Sonca oziroma Zemlje [10–12]). 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 utrinilo jeseni leta 1964 med prehodom [14]. Razvil je posebno matematično

¹Zaradi 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 ta premik.

metodo, imenovano »ujeta površina«, ki jo kaže slika 2. Ujeta površina je sklenjena dvodimenzionalna površina, ki ima lastnost, da vsi svetlobni žarki, ki so pravokotni nanjo, konvergirajo/se stikajo v prihodnosti [15]. Za primerjavo, površje krogle v ravnem prostoru ni takšno: žarki, ki gredo vanj, konvergirajo, žarki, ki prihajajo iz njega, 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 s polmerom manjšim od Schwarzschildovega. Vsi svetlobni žarki skozi nje kažejo proti središču.

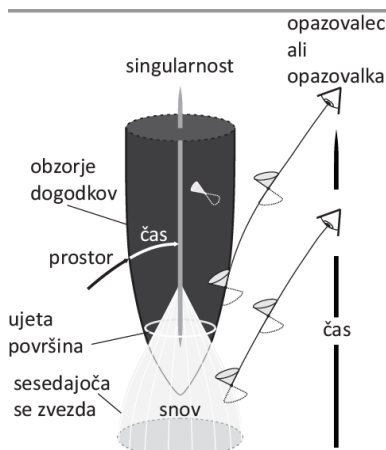
Posledica ujete površine je, da tok časa neizogibno prinese opazovalca, ki je prečkal obzorje dogodkov, v končnem času v središče $r = 0$, kjer se čas konča. Iz Schwarzschildove rešitve namreč sledi, da se ob prečkanju obzorja dogodkov vlogi časovne in radialne koordinate zamenjata – smer proti središču 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 površine 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.

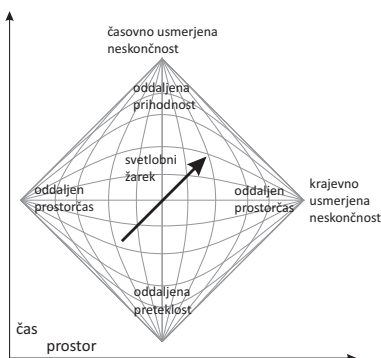
Supermasivna črna luknja v središču naše Galaksije

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 majčkeni 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),



Slika 2. Diagram na osnovi slike iz Penrosevega članka [15] prikazuje sesedanje zvezde v črno luknjo. Vodoravna ravnina predstavlja prostor, na navpični osi je čas. Ko se zvezda skrči pod obzorje dogodkov, nastane črna luknja. Znotraj nje se snov sesede še naprej, v točko singularnosti. Svetlobni stožci se v ukrivljenem prostor-času nagibajo »navznoter«, proti masi. Na obzorju dogodkov je zunanji rob časovnega stožca navpičen – svetloba bi potrebovala neskončno časa, da bi prišla ven oz. zunanji opazovalec vidi »zamrznjeno« sliko na obzorju dogodkov. Znotraj črne luknje so vsi svetlobni stožci obrnjeni proti središču, singularnosti, in svetloba ne more pobegniti. Časovna in radialna koordinata na obzorju dogodkov zamenjata vlogi.



Slika 3. V Penroseovem diagramu je neskončen 4-dimenzionalen prostor-čas preslikan na končno velik 2-dimenzionalni lik. Prostorska koordinata je na vodoravni osi, čas teče navpično navzgor. Svetlobni žarki so pod kotom 45° glede na osi.

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 velikostnega reda Schwarzschildovega polmera. Edini primer do leta 2020, ko je bila podeljena omenjena nagrada, v katerem jim je uspelo posneti sliko diska snovi v neposredni okolici črne luknje, je radijski posnetek središča aktivne galaksije M 87, ki ga je naredila mreža Event Horizon Telescope in je aprila leta 2019 obšel svet [3]. Dosežena kotna ločljivost v tem primeru je podobna tisti, ki bi jo morali imeti, da bi, sedeč v Evropi, brali časopis v New Yorku. (Maja 2022 je omenjena mreža objavila tudi radijski posnetek središča naše Galaksije [18].)

Oči radovednih znanstvenikov so se že pred tem 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 gibanje 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 korenom 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.

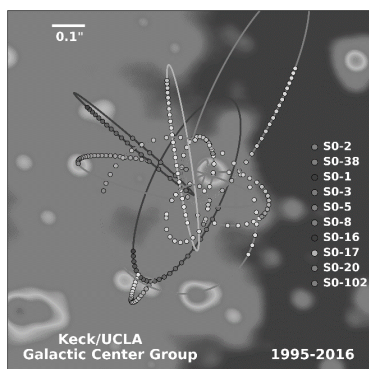
Da bi razvozlala skrivnost središča Galaksije, sta se v devetdesetih letih dvajsetega stoletja Andrea Ghez in Reinhard Genzel s svojima raziskovalnima skupinama lotila opazovanja gibanja zvezd v njem [4–8]. Skupina Andree Ghez je uporabila teleskope na observatoriju na Havajih, skupina Reinharda Genzela teleskope Evropskega južnega observatorija v Čilu. Plin in prah v disku Galaksije povzročata ekstinkcijo (oslabitev) vidne svetlobe. Galaktično središče je v tej svetlobi »zakrito« pred našim pogledom, zato 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 desetinko sekunde), jih med seboj poravnajo, tako da se vzorci zvezd »ujamejo«, jih seštejejo in tako dobijo ostrejške slike. 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, kompaktno telo. S to tehniko se jim

je središču Galaksije uspelo približati na približno dvanajst svetlobnih dni.

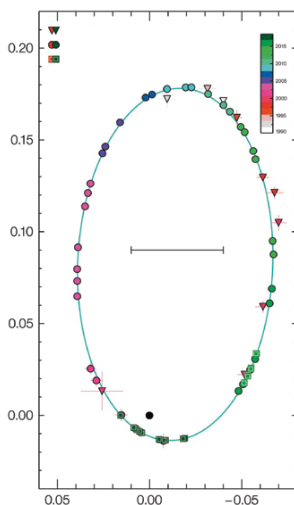
V novem tisočletju so začeli na obeh observatorijih uporabljati prilagodljivo optiko [2]. Pri tej tehniki usmerijo laserski snop blizu opazovanega objekta na nebu in visoko v ozračju ustvarijo umetno zvezdo. Nato opazujejo oba – umetno zvezdo in objekt opazovanja – ter s hitrim spreminjanjem oblike zrcala 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 4 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 izvoru Sgr A* približa na zgolj sedemnajst svetlobnih ur.



Slika 4. Tirnice zvezd v bližini središča naše Galaksije v obdobju 1995 do 2016, kot jih je izmerila skupina Andree Ghez. Bela črta označuje tirnico zvezde S0-2 oziroma S2. Vir: Keck/UCLA Galactic Center Group.

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 samo stopetindvajsetkratnik Zemljine razdalje od Sonca. Prispevek zvezd in ostankov zvezd k tej masi je zanemarljiv, torej gre za zelo kompaktno telo. Najbolj 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



Slika 5. Tirnica zvezde S2 okoli središča naše Galaksije, kot so jo določili na podlagi petindvajset let opazovanj s teleskopi Evropskega južnega observatorija v Čilu [1]. 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)). Odtенок sive označuje leto meritve položaja. Daljica v notranjosti tirnice prikazuje razdaljo $5000\,r_s$ oziroma 400 razdalj Zemlja-Sonce. (Velikosti zvezde in črne luknje nista v pravilnem razmerju z razdaljami). Vir: ESO/MPE/GRAVITY Collaboration.

potovala skozi pericenter – točko na svoji tirnici, v kateri se najbolj približa Sgr A* [5] (slika 5).

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 leta 2017) odpira novo okno v vesolje in nam pomaga razkrivati skrivnosti črnih lukenj na povsem nov način.

LITERATURA

- [1] R. Abuter et al., *Gravity Collaboration, Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*, *Astronomy and Astrophysics*, **615** (2018), doi: 10.1051/0004-6361/201833718.
- [2] H. W. Babcock, *The possibility of compensating astronomical seeing*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **65** (1953) 386, 229, doi: 10.1086/126606.

- [3] S. Doeleman et al., *Focus on the First Event Horizon Telescope Results*, The Astrophysical Journal Letters, **875** (2019) 1, doi: 10.3847/2041-8213/ab0f43.
- [4] R. Genzel, R. Schödel, T. Ott, A. Eckart, T. Alexander, F. Lacombe, D. Rouan et al., *Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic centre*, Nature, **425** (2003) 6961, 934–937, doi: 10.1038/nature02065.
- [5] R. Genzel, F. Eisenhauer in S. Gillessen, *The Galactic center massive black hole and nuclear star cluster*, Reviews of Modern Physics, **82** (2010) 4, 3121–3195, doi: 10.1103/RevModPhys.82.3121.
- [6] A. M. Ghez, B. L. Klein, M. Morris in E. E. Becklin, *High proper-motion stars in the vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy*, The Astrophysical Journal, **509** (1998) 2, 678–686, doi: 10.1086/306528.
- [7] A. M. Ghez, G. Duchene, K. Matthews, S. D. Hornstein, A. Tanner, J. Larkin, M. Morris et al., *The First Measurement of Spectral Lines in a Short-Period Star Bound to the Galaxy’s Central Black Hole: A Paradox of Youth*, The Astrophysical Journal, **586** (2003) 2, L127–L131, doi: 10.1086/374804.
- [8] A. M. Ghez, S. Salim, N. N. Weinberg, J. R. Lu, T. Do, J. K. Dunn, K. Matthews et al., *Measuring distance and properties of the Milky Way’s central supermassive black hole with stellar orbits*, The Astrophysical Journal, **689** (2008) 2, 1044–1062, doi: 10.1086/592738.
- [9] A. Gomboc, *Črne luknje – od prve zamisli do Nobelove nagrade*, Proteus, **83** (2021), 6, 250–6.
- [10] P. S. Laplace, *Beweis des Satzes, dass die anziehende Kraft bey einem Weltkörper so gross seyn könne, dass das Licht davon nicht ausströmen kann*, Allgemeine Geographische Ephemeriden, **4** (1799) 1–6.
- [11] P. S. Laplace, *Exposition du Système du Monde, Part II*, 1796.
- [12] J. Michell, *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, & c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, **74** (1783) 35–57.
- [13] A. Mohorič in A. Čadež, *Gravitacijski valovi*, Obzornik mat. fiz., **63** (2016) 2.
- [14] R. Penrose, *Asymptotic properties of fields and space-times*, Physical Review Letters, **10** (1963) 2, 66–68, doi: 10.1103/PhysRevLett.10.66.
- [15] R. Penrose, *Gravitational collapse and space-time singularities*, Physical Review Letters, **14** (1965) 3, 57–9, doi: 10.1103/PhysRevLett.14.57.
- [16] M. Schmidt, *3C 273: A star-like object with large red-shift*, Nature, **197** (1963) 4872, 1040, doi: 10.1038/1971040a0.
- [17] K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademi der Wissenschaften, 1916.
- [18] *The Event Horizon Telescope Collaboration*, First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results, I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way, The Astrophysical Journal Letters, **930** (2022) L12. doi: 10.3847/2041-8213/ac6674.
- [19] *About Andrea Ghez*, dostopno na <https://www.astro.ucla.edu/~ghez/>, ogled 20. 11. 2023.