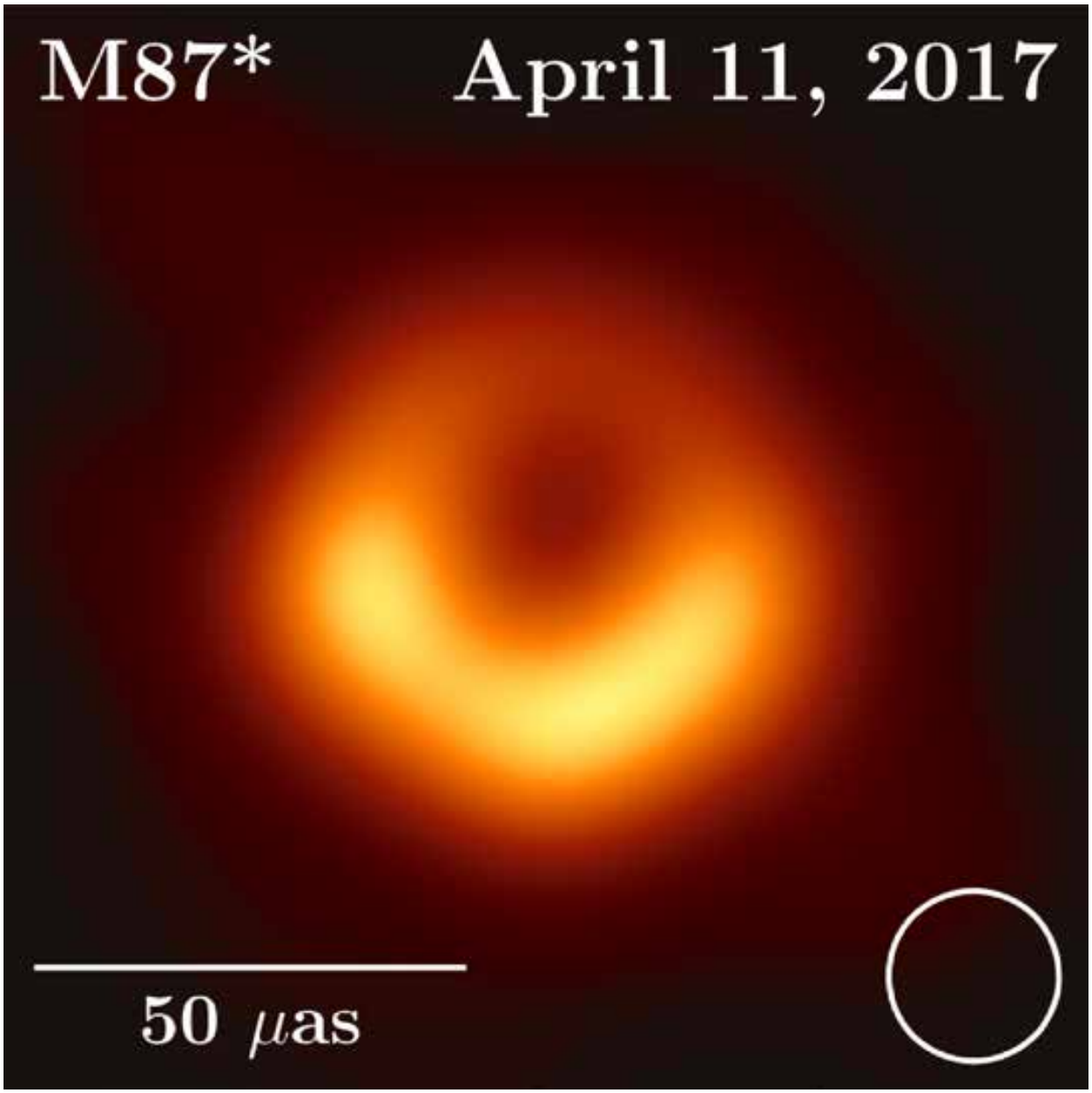
Prva slika neposredne okolice črne luknje

Tomaž Zwitter

Slika okolice črne luknje v jedru galaksije M87, ki jo je aprila objavila ekipa Teleskopa dogodkovnega obzorja (EHT), je najpodrobnejša makroskopska slika narave doslej. Zato se bomo vprašali, kaj vidimo, zakaj je to pomembno, pa tudi, kako se raziskav črnih lukenj dotikamo Slovenci.



Slika neposredne okolice črne luknje v jedru galaksije M87. Krog na desni ponazarja kotno ločljivost slike, merilo na levi pa kot 50 milijonink ločne sekunde. Na sliki je sever zgoraj, zahod pa na desni. Vir: Kolaboracija EHT

Masa, velikost in gostota

Raketa uide Zemljini težnosti le, če se giblje vsaj z ubežno hitrostjo, ki je enaka $\sqrt{(2\ G\ M\ /\ r)}$, kjer je G gravitacijska konstanta, M masa Zemlje, r pa razdalja rakete od Zemljinega središča. Za raketo blizu Zemljinega površja je ubežna hitrost enaka 11,2 kilometra na sekundo. Če bi imela Zemlja ob enaki masi 725-milijonkrat manjšo velikost, bi bila ubežna hitrost z njenega površja enaka hitrosti svetlobe (c), to je skoraj 300 tisoč kilometrov na sekundo. Tak račun sicer ni pravilen, saj bi namesto Newtonove fizike morali uporabiti Einsteinovo splošno teorijo relativnosti. Kljub temu pa tudi v relativnostni teoriji velja obrat zgornjega izraza, ki pravi, da z objekta z velikostjo $r = 2\ G\ M\ /\ c^2$ ne more pobegniti niti svetloba. Za maso Zemlje je to velikost frnikole, za maso Sonca ta velikost naraste na 3 kilometre, za 6,5 milijarde Sončevih mas pa je enaka 130-kratni razdalji med Zemljo in Soncem, to je približno sedanja oddaljenost sond Voyager, izstreljenih leta 1977. Objekt, katerega masa je zbrana znotraj takega gravitacijskega polmera, imenujemo črna luknja, ploskev s tem polmerom pa dogodkovno obzorje. Na svojo okolico črna luknja vpliva le s svojo maso in s tem gravitacijskim privlakom in z morebitnim vrtenjem, za skupni električni naboj črne luknje pa pričakujemo, da je, podobno kot pri zvezdah ali planetih, enak nič. Prav nobena druga informacija o stanju snovi v notranjosti črne luknje ne more prodreti do zunanjega opazovalca. Torej je opis črnih lukenj relativno čist, pravimo, da niso dlakave (»no-hair theorem«).

Mnogi si predstavljajo, da gostota snovi v črni luknji seže v nepredstavljivo velike številke. To je gotovo res za črno luknjo mase Zemlje, ki bi imela velikost frnikole, manj pa za masivnejše črne luknje. Dvojna masa namreč pomeni tudi dvojno velikost v vsaki od treh razsežnosti in zato osemkrat večjo prostornino, s tem pa štirikrat manjšo povprečno gostoto. Snov v zgoraj omenjeni črni luknji z milijardami Sončevih mas bi bila tako v povprečju redkejša od zraka, ki ga sedajle dihate.

Črne luknje v naravi

Glavni podatek, ki opredeljuje črno luknjo, je njena masa. Kljub vztrajnemu iskanju niso uspeli najti takih z maso, manjšo od treh Sončevih mas. Torej je najverjetneje tudi Hawkingova ideja o izhlapevanju črnih lukenj nepomembna in lahko za črne luknje v naravi trdimo, da so večne in se njihova masa z vsakim zalogajem, ki ga pogoltnejo, le veča.

Maso je najlažje tehtati v dvozvezdjih. Kot lahko maso našega Sonca določimo po hitrosti in obhodnem času planeta Zemlja, lahko tudi hitro gibanje običajne zvezde po krožnem tiru izdaja maso nevidne spremljevalke. Če ta preseže tri mase Sonca, vemo, da so take zvezde vedno zelo svetle. Torej temna spremljevalka ni običajna zvezda, obenem pa je preveč masivna za stisnjene preostanke zvezdnih sredic, kot so bele pritlikavke ali nevtronske zvezde. Tako opazovanje lahko razložimo le s prisotnostjo črne luknje. Temnega objekta z veliko maso in majhno velikostjo namreč ne znamo razložiti drugače kot s črno luknjo. Leta 1983 sta tako McClintock in Remillard pokazala, da je objekt A0620-00 prav tak par običajne zvezde z maso malo pod Sončevo in črne luknje.

V devetdesetih letih so se nato lotili pregledov neba, s katerimi so črne luknje želeli zaznati preko gravitacijskega lečenja, ko masivni objekt nekoliko ukrivi oziroma zbere svetlobo in s tem posvetli sij zvezde, ki bi bila natanko za njim. Obsežna pregleda z imenoma MACHO in EROS sta pokazala, da so take zablodele črne luknje redke in jih je vsekakor premalo, da bi z njimi lahko pojasnili naravo temne snovi.

Z detektorji LIGO in VIRGO so od leta 2016 sedemkrat zaznali gravitacijske valove, ki nastanejo ob zlivanju dveh črnih lukenj. Pred zlitjem so imele te črne luknje mase

od 10 do 30 Sončevih mas. Njihov obstoj nakazuje, da so ti objekti morda sesute sredice zelo masivnih zvezd prve generacije, nastalih v mladem vesolju, ki je imelo sedemdesetino današnje starosti.

Končno so tu še mnogo masivnejše črne luknje v središčih galaksij. Po hitrem gibanju običajnih zvezd okoli nevidne mase v središču naše Galaksije, kjer zvezda z oznako S0-38 v 19 letih opiše elipso z veliko polosjo velikosti 1100-kratne razdalje med Zemljo in Soncem, so leta 2016 Boehle in sodelavci določili maso črne luknje v središču naše Galaksije na 4 milijone Sončevih mas. Črne luknje v središčih drugih galaksij so lahko še mnogo masivnejše. Kot bomo videli v nadaljevanju, ima tista v galaksiji M87 maso 6,5 milijarde Sončevih mas.

Črne luknje niso nujno temni objekti, saj se snov, ki pada nanje, pri tem zelo segreva in sveti. Svetle okolice črnih lukenj v galaktičnih središčih imenujemo aktivna galaktična jedra. Ta sij se lahko tudi hitro spreminja s časom, saj velikost emisijskega območja okoli črne luknje v galaksiji M87 svetloba preleti v nekaj dneh, v naši Galaksiji pa v nekaj minutah. Črna luknja v galaksiji M87 je zanimiva tudi zato, ker iz njene neposredne okolice brizgata dva nasprotno usmerjena curka snovi, ki je črna luknja ni uspela požreti. Svetlejšega od obeh curkov je že leta 1918 odkril Herbert Curtis. Iz radialnega premikanja zgoščin v tem curku vemo, da se njegova hitrost zelo približa svetlobni hitrosti in da s smerjo proti Zemlji oklepa kot samo 17 stopinj. Ti curki brizgajo zelo daleč onkraj domače galaksije. Tako osrednja črna luknja lahko vpliva tudi na širšo galaktično okolico. Podoben primer kot aktivna galaktična jedra in njihove najbolj svetle izpeljanke, ki jih imenujemo kvazarji, je tudi ena najsvetlejših zvezd v naši Galaksiji z oznako SS433, ki ji pravijo tudi mikrokvazar. Tudi tu iz bližine kompaktnega objekta brizgata nasprotno usmerjena curka snovi, v kateri snov doseže četrtino svetlobne hitrosti.

Slikanje črne luknje

Poznane črne luknje same ne oddajajo svetlobe. To pa ni nujno res za njihovo neposredno okolico. Snov se, ko se med spiralnim približevanjem črni luknji niža njena gravitacijska energija, močno segreje. V primeru galaksije M87 ioni dosežejo temperaturo bilijona, elektroni pa do nekaj deset milijard stopinj, tako da se gibljejo skoraj s svetlobno hitrostjo. Govorimo o redki prozorni plazmi, ki je prevodna, zato s seboj nosi tudi magnetne silnice, ki se z bližanjem črni luknji vse bolj navijajo in gostijo. Elektroni, ki krožijo v močnem magnetnem polju, sevajo. Ker so njihove hitrosti zelo velike, je to sinhrotronsko sevanje. Ko se bližamo črni luknji, gostota sevanja sicer narašča, vendar ga tudi vedno več konča v črni luknji in je zato za nas nevidno. Najsvetlejše območje je zato približno 2,6 gravitacijskega polmera od črne luknje, kjer je zaradi črne luknje prostor tako močno ukrivljen, da svetloba kroži okoli črne luknje. Svetloba, ki (morda tudi po več krogih) zavije navznoter, pade v luknjo. Tista, ki uspe uiti in nadaljuje v tangencialni smeri, pa se nam nariše kot svetel obroč. To je podobno, kot če bi imeli na Luni množico vozil, ki bi vozila v vse mogoče smeri in bi imela prižgane žaromete, s katerimi bi si osvetljevala pot pred seboj. Tudi v tem primeru bi z Zemlje videli le obroč žarometov na robu Luninega diska, saj so le tam vozila, ki so usmerjena proti nam.

Svetel obroč okoli črne luknje je z Zemlje videti majhen. Štiri milijone Sončevih mas v središču naše Galaksije pomeni obroč s polmerom 31 milijonov kilometrov, ki na razdalji 25 tisoč svetlobnih let oklepa kot 2,7 stotisočinke ločne sekunde. Polmer obroča v galaksiji M87 pri 6,5 milijarde Sonc in razdalji 55 milijonov svetlobnih let je enak dvem stotisočinkam ločne sekunde. Obe številki sta izjemno majhni, saj ustrezata kotu, ki ga oklepa pol milimetra debela bilka, ki bi bila tako daleč, kot je Ljubljana od New Yorka. Žal so vse druge črne luknje

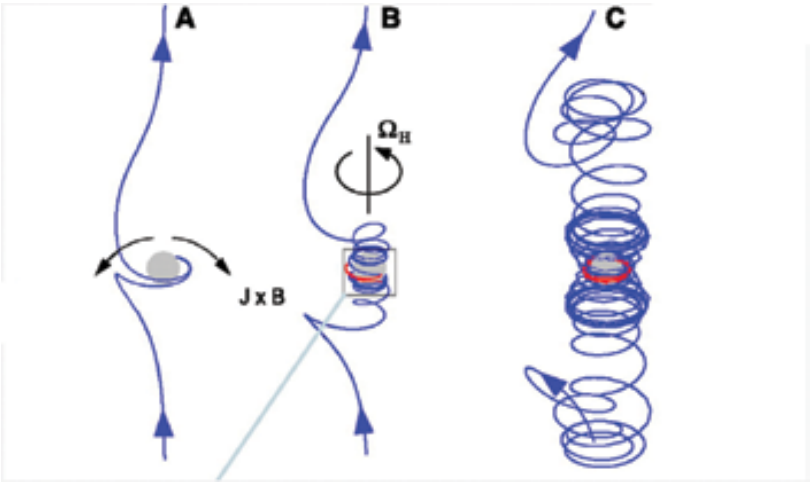


Nam najbližji teleskop mreže EHT stoji na Pico Valeta v Španiji (zgoraj), najbolj oddaljeni pa je na južnem Zemljinem tečaju (spodaj). Vir: Kolaboracija EHT.

videti še manjše.
Take podrobnosti je mogoče zaznati le z interferometrijo, to je s primerjanjem svetlobnega valovanja istega objekta, ki ga hkrati opazujemo z več zelo oddaljenimi teleskopi. Pri paru teleskopov tako lahko spremljamo razliko razdalj od objekta do enega ali drugega teleskopa na del valovne dolžine natančno. Torej vzdolž zveznice med teleskopoma lahko dosežemo kotno ločljivost, ki ustreza delu valovne dolžine na razdalji med teleskopoma. Če je takih parov teleskopov z zveznicami v različnih smereh več, lahko ugotovimo, kakšna mora biti slika objekta, da bodo vse izmerjene razlike v svetlobnih valovanjih ustrezale našim meritvam.
Z mrežo Teleskopa dogodkovnega horizonta (Event Horizon Telescope, EHT) so opazovali svetlobo z valovno dolžino le 1,3 milimetra, teleskopi pa so bili razmaknjeni skoraj toliko, kot je Zemljin premer. To jim je omogočilo lov na sliko obroča okoli črne luknje s kotno velikostjo stotisočink ločne sekunde. Meritve so opravili v štirih dneh med 5. in 11. aprilom leta 2017. Med obema možnima tarčama so izbrali črno luknjo v galaksiji M87, saj so tu lahko predpostavili, da se izvor med opazovanji ni spreminjal. Galaksijo M87 so opazovali s teleskopi Pico Valeta v Španiji, LMT v Mehiki, SMT v Arizoni, ALMA in APEX v Čilu in SMA ter JCMT na Havajih. Pri umeritvi opazovanj je pomagal še teleskop SPT na južnem Zemljinem tečaju. V vseh primerih so nihanje milimetrskih valov pri dveh bližnjih frekvencah in v dveh polarizacijah ter časovne signale atomske ure sproti s hitrostjo 32 milijard bitov na sekundo zapisovali na zelo hitre računalniške diske. Korelacija zapisov vseh teleskopov v podatkovnih centrih na MIT-u in na Inštitutu Maxa Plancka v Bonnu je rodila enolično rekonstrukcijo slike neposredne okolice črne luknje. Rezultat so mesece preverjali z uporabo inverznih in direktnih tehnik rekonstrukcije slike ter z vrsto slepih testov z računalniško generiranimi podatkovnimi nabori. V vseh primerih so dobili isti rezultat: svetel obroč s polmerom 21 milijonink ločne sekunde, ki je na južni strani nekoliko svetlejši.

Interpretacija slike

Prvi zelo robustni rezultat je bila meritev mase črne luknje v galaksiji M87. Opaženi polmer obroča ustreza masi 6,5 milijarde Sonc s statistično negotovostjo 10 odstotkov. Rezultat je skoraj neodvisen od vrtenja opazovane črne luknje. Drugače je z opaženo posvetlitvijo južne strani obroča. Curek snovi v galaksiji M87, ki brizga skoraj proti nam, je od smeri proti Zemlji nagnjen za 17 stopinj proti zahodu. Snov v bližini črne luknje se giblje blizu ravnine, pravokotne na os vrtenja črne luknje, za katero predpostavimo, da je poravnana s smerjo curka. Pri tem je zaradi izjemno velikih hitrosti in s tem povezane Dopplerjeve posvetlitve nekoliko svetlejši videti tisti del obroča, v katerem se snov giblje bolj v naši smeri. Ker je svetlejši južni del, se mora snov vrteti v smeri urinega kazalca. Zadnji sklep je težak, zato si pomagajmo z miselnim poskusom. Zamislite si, da opazujete balon nad sabo, ki pa je nagnjen, tako da je njegova košara zmaknjena proti zahodu, podobno kot curek v galaksiji M87. Če se balon vrti v smeri urinega kazalca, se južni del njegovega oboda res spušča oziroma približuje Zemlji, severni pa se dviga, podobno kot obroč v galaksiji M87.
Vprašanje seveda je, kaj povzroča vrtenje snovi v bližini črne luknje in kako to vrtenje rodi curka snovi, v katerih snov brizga skoraj s svetlobno hitrostjo. Ko so ob sliki črne luknje upoštevali še kinetično energijo, ki jo odnaša snov v curkih, in rentgensko svetlobo, ki pri tem nastaja, so prišli do dveh zanimivih ugotovitev. Kot prvo, črna luknja se mora vrteti in to zelo hitro, to je vsaj s polovico ali celo devetimi desetinami največje hitrosti, ki še omogoča obstoj dogodkovnega obzorja. In kot drugo, gibanje snovi v okolici črne luknje povsem nadzira vrtenje črne luknje same. Smer spiralnega



Ob navijanju magnetnih silnic okrog vrteče se črne luknje se te močno zgostijo, nastali magnetni tlak pa potisne snov v dva curka, usmerjena vzdolž vrtilne osi. Vir: Semanov in dr., 2004, Science, 305: 978.

gibanja snovi, ki se črni luknji približuje, je pri tem povsem nepomembna. Torej se črna luknja v galaksiji M87 vrti v smeri urinega kazalca. Ob tem vleče s seboj tudi magnetne silnice, ki se pri tem navijajo, dokler se ob osi vrtenja ekplozivno ne sprožijo in skoraj s svetlobno hitrostjo poženejo snov v nasprotno usmerjena curka. Ta mehanizem, ki sta ga leta 1977 predlagala Blandford in Znajek, so tako uspešno uporabili za razlago usmerjanja in pospeševanja curkov snovi iz jeder aktivnih galaksij, s tem pa nakazali vlogo hitro vrtečih se črnih lukenj. Energija v curkih pri tem prihaja iz vrtenja črne luknje. Za pospeševanje curkov je potrebnih vsaj 10^{35} vatov moči, ki navzven požene del od kakih 10^{19} kilogramov snovi, ki se vsako sekundo znajdejo v bližini črne luknje, preostanek pa požre črna luknja. Kljub temu, da je ta moč precejšnja in se zato vrtenje črne luknje ustavlja, se bo sukanje črne luknje v galaksiji M87 znatno upočasnilo šele, ko bo vesolje nekaj stokrat starejše od današnjega. Če je ta razlaga pravilna, se slika črne luknje v galaksiji M87 v prihodnje ne bo znatno spreminjala, saj jo določa stabilno vrtenje orjaške črne luknje. To bodo seveda preverili s prihodnjimi opazovanji. Pričakujemo lahko tudi sliko okolice črne luknje v naši Galaksiji, ki pa se v času lahko mnogo hitreje spreminja. Črne luknje v drugih aktivnih galaktičnih jedrih so predaleč, da bi jih lahko razločili. Če seveda razdalje med teleskopi ne bodo še povečali, tako da bodo združevali meritve več teleskopov raztresenih po Osončju. To se zdi obetavno, saj slike v svetlobi milimetrskih valovnih dolžin edine lahko razločijo podrobnosti, ki so sicer le v domeni gravitacijskih valov.

Črne luknje in Slovenci

Kot prvi je zlivanje črnih lukenj, ki so ga sedaj z gravitacijskimi valovi opazovali v okviru projekta LIGO, v okviru doktorata leta 1971 obravnaval Andrej Čadež. Nobelovec Kip Thorne ga ima zato za očeta numerične relativnosti. V osemdesetih letih je bil Čadež tudi pomemben član projekta LIGO. Njegov je predlog, da zrcala premikajo z elektromagnetnimi silami. Njegovi izračuni gretja zrcal zaradi izgub pri odboju svetlobe in lastnosti stekel so vodili tudi do uporabe infrardeče namesto prvotno načrtovane vidne svetlobe v tem instrumentu. Kasneje je Čadež skupaj s doktorandoma Andrejo Gomboc in Urošem Kostićem obravnaval raztrganje zvezde, ki pade v črno luknjo, in načine izračuna svetlobe, ki jo pri tem vidi oddaljeni opazovalec. Z italijanskimi kolegi pa je raziskoval videz relativističnih diskov, v katerih se snov spiralno približuje črni luknji.

Sam sem v okviru doktorata leta 1990 pojasnil naravo dvojne zvezde v mikrokvazarju SS433. Desetletje kasneje smo z ameriškim in italijanskima kolegoma uspeli sestaviti

fizikalno klasifikacijsko shemo za aktivna galaktična jedra. Močno sevanje galaksije M87 v milimetrskih valovnih dolžinah, velika masa tamkajšnje črne luknje, relativno majhen tok snovi proti črni luknji in majhen naklon med curkom in smerjo proti Zemlji se lepo ujemajo z našimi pričakovanji.
Janez Kos je z ameriškimi in nizozemskimi kolegi soavtor študije, v kateri so leta 2013 pokazali, da so v plinu, ki brizga v curkih v galaksiji M87, prisotna močna magnetna polja, kar se ujema z zgornjo razlago slike teleskopa EHT. Gabrijela Zaharijaš je del številne ekipe, ki med drugim preučuje hkratne zaznave nevtrinov in visokoenergijske svetlobe ob izbruhih aktivnih galaktičnih jeder. Dunjo Fabjan pa raziskovalno zanima širša slika, to je vpliv aktivnih galaktičnih jeder in njihovih curkov na širše okolje jat galaksij. To zna biti pomembno tudi za dobavo svežega plina, ki vzdržuje nadaljevanje nastajanja novih zvezd, med katerimi je bilo pred slabimi petimi milijardami let tudi naše domače Sonce in z njim Zemlja.

Kaj Darwin ni rekel?

Kazimir Tarman

Preden začnem pisati, naj voščim Charlesu Darwinu za rojstni dan. 12. februarja je preteklo 210 let od rojstva in 160 let od izida knjige *O nastanku vrst*. Staro slutnjo o evoluciji je znanstveno utemeljil. K verodostojnosti teorije je dodalo še naključje: enako odkritje rojaka Alfreda Rusella Wallacea. Darwin in Wallace sta do odkritja prišla neodvisno drug od drugega, oba sta bila spodbujena z idejo Thomasa Roberta Malthusa in oba sta delovala na otočjih, Darwin na Galapagosu in Wallace na Sundih.
Naslov članka *Kaj Darwin ni rekel?* ni mišljen dobesedno. Želel sem ga le razbremeniti tega, kar so mu podtaknili tako somišljeniki kot nasprotniki. Hotel sem poudariti njegovo občutljivost za krivice, posebej suženjstva, doživetega v Južni Ameriki. Zaradi zlorab njegovih spoznanj v družbeno-gospodarskih odnosih je bila nanj naslovljena kritika zgrešena. Javno je nasprotoval prenašanju svoje teorije na odnose v človeški družbi.

Odpor ...

O odporu do teorije o nastanku vrst, ki je odstrla pogled na razvoj življenja, ki ni ustrezal stvarjenju sveta, zapisanemu v *Stari zavezi Biblije*, sedaj ne bom razpredal. O zgodovini odpora, v svetu in doma, je bilo veliko napisanega tudi v slovenščini, še posebej po stopetdesetletnici izida knjige (2009).

... raba in tudi zloraba

Buržoazna elita viktorijanske Anglije, ki je razvijala industrijsko družbo, je izrabila teorijo naravnega izbora za opravičilo izkoriščanja delavcev. Ker v »boju za obstanek« zmagujejo najsposobnejši, je izkoriščajoči odnos do manj sposobnih naraven in opravičljiv. Naš profesor Jovan Hadži bi taki metodi rekel »kufer teorija«: pred popotovanjem potisnemo v kovček (= v žargonu *kufer*, nemško *der Koffer*) to, kar rabimo na poti, vse drugo ostane doma. Sprenevedava zamisel prenosa »boja za obstoj in naravne-