

## Postoje li crne rupe, Nobelova nagrada za fiziku 2020.

Maro Cvitan<sup>1</sup>

Ovogodišnja Nobelova nagrada za fiziku dodijeljena je Rogeru Penroseu, Reinhardu Genzelu i Andrei Ghez. Teorijski Penroseov rad unaprijedio je saznanja o tipu rješenja Einsteinove jednadžbe koja nazivamo crne rupe. Penroseu je dodijeljena polovica nagrade i to za “otkriće da je nastajanje crnih rupa robusna predikcija opće teorije relativnosti” [1]. Genzel i Ghez su neovisno eksperimentalno utvrdili da je u objektu u središtu naše galaksije velika količina mase u malom prostoru što je kompatibilno s crnom rupom, te im je zajedno dodijeljena druga polovica nagrade i to za “otkriće supermasivnog kompaktnog objekta u središtu naše galaksije” [1].

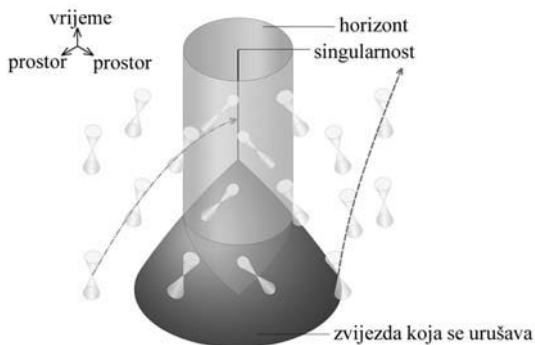
### Opća teorija relativnosti, crne rupe

U općoj teoriji relativnosti Einsteinova jednadžba opisuje kako se prostor i vrijeme zakrivljuju zbog prisustva materije. Svako rješenje te jednadžbe daje jedan mogući ‘oblik’ (tj. zakrivljenost) prostora i kaže nam mijenja li se ta zakrivljenost u vremenu i kako. Tijekom razdoblja od nekoliko desetljeća pronašlo se i razumjelo da te jednadžbe predviđaju i specifičan tip rješenja koja imaju svojstvo da iz nekog konačnog dijela prostora, opisanog rješenjem, ništa (ni svjetlost) ne može izaći van. Taj dio prostora naziva se crna rupa. Granica iza koje nema više mogućnosti povratka van naziva se horizont događaja.

Da bismo dobili rješenja koja opisuju crne rupe moramo riješiti Einsteinove jednadžbe. U općem slučaju kad prostor i vrijeme nemaju simetrije, te jednadžbe su komplicirane za rješavanje. Ipak, analitičko rješenje za prazan prostor s masom u središtu može se naći (npr. rješavanjem olovkom i papirom) u statičnom sferno simetričnom slučaju. Einstein je na početku razmatrao takvo sferno simetrično rješenje, ali nije riješio svoje jednadžbe za dio prostora unutar i u blizini horizonta. To je uspio Karl Schwarzschild 1916. godine, već nekoliko tjedana nakon što je Einstein objavio svoju jednadžbu. U to doba nije bilo jasno da je horizont granica iza koje više nema povratka. Na mjestu gdje je horizont, u Schwarzschildovim se izrazima pojavljuju beskonačnosti. U tim izrazima se pojavljuje i beskonačnost u središtu objekta (koja je manje nezgodna jer je skrivena iza horizonta). Zbog tih beskonačnosti, desetljećima nije bilo jasno treba li odbaciti dio tog rješenja gdje su beskonačnosti, cijelo rješenje ili čak cijelu teoriju.

Tek 1958. godine je Finkelstein objasnio da se beskonačnosti na mjestu horizonta ne pojavljuju ako se isto Schwarzschildovo rješenje opiše u drugom koordinatnom sustavu. Time je otpao jedan razlog za odbacivanje tog rješenja. Razlog manje za odbacivanje tog rješenja je razlog više za postavljanje pitanja postoje li u prirodi takvi objekti. Ako je odgovor da, Schwarzschildovi izrazi predviđaju da veličina horizonta mora biti proporcionalna masi. Za crnu rupu koja bi imala masu kao Sunce, veličina horizonta bi bila nekoliko kilometara. Crna rupa mase 4 milijuna masa Sunca imala bi veličinu horizonta reda jedne desetinke a.j. Jedinica a.j. je definirana kao: 1 a.j. = udaljenost od Sunca do Zemlje = 149.6 milijuna km.

<sup>1</sup> Autor je profesor na Fizičkom odjelu PMF-a u Zagrebu, Zavod za teorijsku fiziku čestica i polja; e-pošta: mcvitan@phy.hr



*Urušavanje zvijezde i nastajanje horizonta. Prikazane su dvije prostorne i vremenska dimenzija. Urušavanje zvijezde prikazano je kao smanjivanje radijusa zvijezde u vremenu. Stošci kojima se mijenja nagib prikazuju moguće smjerove gibanja svjetlosti. Krivulja označena točkama i crtama predstavlja zraku svjetlosti koja upada u crnu rupu. Iscrtkana krivulja predstavlja zraku svjetlosti koja iz zvijezde ide van prema beskonačnosti. Horizont događaja je ploha gdje svjetlost koja bi trebala ići prema van to ne 'uspijeva'. Prikazana slika je prilagođena verzija slike na poveznici:*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light\\_cones\\_near\\_black\\_hole.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_cones_near_black_hole.svg)  
 autor: Cmglee, CC BY-SA 4.0.

## Roger Penrose

Spomenuto pitanje postojanja crnih rupa dobilo je dodatnu težinu otkrićem kvazara 1963. Takvi objekti bili su poznati i prije, ali tek se tada shvatilo da su oni jako udaljeni i da ne pripadaju našoj galaksiji. To je značilo da je njihov sjaj puno veći nego što se mislilo. Neki od otkrivenih kvazara imali su sjaj koji je nepredvidljiv i mijenja se na skalama reda dana ili čak sata. Tako brze varijacije (dan ili sat) daju ograničenje na područje u kojem se takvo svjetlo može proizvoditi: svjetlosni dan ( $\sim 200$  a.j.) ili svjetlosni sat ( $\sim 10$  a.j.). Zaključak je da se tako velik sjaj (kao nekoliko stotina galaksija) stvara u malom području reda veličine Sunčevog sustava. Jedino objašnjenje za takav sjaj (i malo područje na kojem se stvara) je da dolazi od upadanja materije u crnu rupu.

Ipak, tada još sve nije bilo sjelo na svoje mjesto što se tiče teorijskih kandidata za crne rupe. Iako je spomenuti problem sa singularnostima na horizontu bio riješen, Schwarzschildovo rješenje nije se smatralo dovoljno realističnim zbog drugog razloga: nije bilo jasno je li pojavljivanje crne rupe posljedica idealizacije tj. posljedica pretpostavke da rješenje ima savršenu (sfernu) simetriju. Dodajmo još da je također 1963. godine Roy Kerr našao rješenje Einsteinove jednačbe koje opisuju rotirajuće crne rupe. Za Kerrovo rješenje vrijedi slično pitanje o realističnosti jer je tu pretpostavljena osna simetrija.

Tu je ključan Penroseov doprinos, koji je pokazao da se takav tip rješenja mora pojaviti uvijek u općoj teoriji relativnosti kad god se materija pozitivne energije nađe unutar tzv. uhvaćene plohe. Ona je koncept koji je Penrose smislio za potrebe svoje analize. To je zatvorena dvodimenzionalna ploha koja ima svojstvo da svjetlost koja krene okomito s nje, na bilo koju stranu, bilo unutra bilo van, ta svjetlost uvijek (zbog zakrivljenosti okolnog prostora i vremena) konvergira. Pojednostavnjeno možemo reći da ta svjetlost, i kad bi trebala ići van, krene prema središtu. Penrose je pokazao da jednom kad se pojave uhvaćene plohe, nije moguće izbjeći stvaranje singularnosti.

Pri tome treba primijetiti da se samo pojavljivanje uhvaćenih ploha događa dok još gustoća materije nije visoka. Taj dokaz, dakle, kaže da je singularnost u središtu Schwarzschildovog rješenja očekivana i da nije posljedica idealizacije. To znači da ono nije tako nerealistično i da je to rješenje (ili Kerrovo) ozbiljan teorijski kandidat za kvazare. Drugim riječima, Penroseov dokaz je išao u prilog tvrdnji da su kvazari crne rupe.

Općenito, rješenja koja sadrže singularnosti smatramo nefizikalnima, osim ako nemamo dobar razlog da ih prihvatimo. Einstein nije poživio do otkrića kvazara i do Penroseovog dokaza da su singularnosti neizbježne. S obzirom da je želio ukloniti singularnosti, Penroseov dokaz bi ga možda naveo da odbaci cijelu svoju teoriju opće relativnosti. Tako su se na račun Einsteina našalili Brian Greene i Roger Penrose u intervjuu [3]. Einstein bi se vjerojatno predomislio kad bi vidio da su detektirani gravitacijski valovi u skladu s teorijom. Šalu na stranu, crne rupe se smatraju prihvatljivim rješenjem iako sadrže singularnost jer je ona skrivena iza horizonta i zbog toga njezino postojanje ne može imati nikakve posljedice koje bismo mogli opaziti. Nadalje, smatra se da bi, još nepoznata, kvantna teorija gravitacije mogla producirati odgovarajuća rješenja u kojima ne bi bilo singularnosti.

---

### Reinhard Genzel i Andrea Ghez

---

U tom periodu uvidjelo se da se kvazari nalaze u središtima drugih galaksija. Pitanje koje se nameće je što je sa središtem naše galaksije: je li i tamo crna rupa. Nadalje, kako možemo razlikovati crnu rupu od neke druge nakupine materije. Ako je masa objekta u središtu toliko velika da oko njega kruže zvijezde, možemo pratiti njihove putanje, doznati koliko traje jedan krug te koliko blizu priđu središtu. Iz toga bi se moglo odrediti koliko je središnja masa zbijena. Iz toga bismo mogli zaključiti je li izgrađena od poznate materije ili je gušća od bilo koje druge poznate. Ovo zadnje bi značilo da se radi o crnoj rupi.



*Teleskopi Keck, Mauna Kea, Havaji. T. Wynne / JPL, Public domain,  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KeckTelescopes-hi.png>*

To su uspjele dvije neovisne istraživačke grupe koje su vodili Reinhard Genzel i Andrea Ghez koji su promatrali zvijezde u području oko središta naše galaksije zvanog Strijelac A\* (Sagittarius A\*). U tom području oko središta veličine cca 5000 a.j. nalazi se 30-tak zvijezda. Sunčev sustav udaljen je 26 tisuća svjetlosnih godina od tog središta (promjer čitave galaksije je 100 tisuća svjetlosnih godina ili  $10^{10}$  a.j.). Teleskopima je moguće vidjeti zvijezde u središtu gledajući u infracrvenom spektru

kroz oblake međuzvjezdane plina i prašine (koji nam zaklanjaju pogled u vidljivom spektru). Spomenute zvijezde kruže oko objekta u središtu naše galaksije.

Grupa R. Genzela koristila je 4-metarski teleskop, NTT (New Technology Telescope, La Silla, Čile), a potom 4 teleskopa 8-metarskog promjera, VLT (Very Large Telescope, Paranal, Čile). Grupa A. Ghez koristila je 10-metarski teleskop Keck (Mauna Kea, Havaji).

Najveća prepreka toliko velikim teleskopima za postizanje potrebne oštine je atmosfera na Zemlji koja uzrokuje izobličenja slike. Jedna od prvih tehnika korištenih za poboljšanje rezolucije bazirala se na tome da se umjesto jednog dugog perioda snimanja (ekspozicije) koristi više kratkih koji se međusobno kombiniraju uz korekciju pomaka. Time se eliminiraju deformacije slike koje nastaju zbog gibanja masa zraka u atmosferi. Nadalje, razvoj tzv. adaptivne optike u teleskopima omogućio je postizanje dovoljne preciznosti da se sitni pomaci zvijezda mogu razaznati. Daljnji razvoj tehnika omogućio je poboljšanje rezolucije od ukupno 1000 puta kroz period od 30-tak godina u kojem se pratilo zvijezde. Za više detalja pogledati [2].



*Very Large Telescope, Paranal, Čile. ESO, CC BY 4.0,*  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aerial\\_View\\_of\\_the\\_VLTI  
\\_with\\_Tunnels\\_Superimposed.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aerial_View_of_the_VLTI_with_Tunnels_Superimposed.jpg)

Jedna od spomenutih zvijezda, nazvana S2, ima orbitu koja je toliko blizu središnjeg objekta da napravi krug za oko 16 godina (za razliku od nas koji za to trebamo oko 200 milijuna godina). Zvijezda S2 kruži po eliptičnoj putanji. U trenutku kad je najbliža središtu priđe mu na 100 a.j. Tada postiže i najveću brzinu koja iznosi 7000 km u sekundi.

Iz tih podataka može se zaključiti da je masa središnjeg objekta 4 milijuna Sunčevih masa. Za više detalja pogledati [4]. Dakle, u prostoru ne većem od Sunčevog sustava (100 a.j.) zbijeno je 4 milijuna Sunčevih masa. Najgušće poznate dugoživučne nakupine tolike količine materije u galaksiji su kuglasti skupovi zvijezda. Za usporedbu, gustoće kuglastih skupova su 11 redova veličina manje (tj. 100 milijardi puta manje) od spomenute minimalne moguće gustoće materije unutar orbite zvijezde S2.

Kako nije poznat drugi kandidat koji bi mogao objasniti svojstva orbite zvijezde S2, tu orbitu smatramo dokazom da je crna rupa u središtu naše galaksije. To nije jedini eksperiment koji je vidio objekte konzistentne s crnim rupama. Primjerice Event Horizon Telescope snimio je 'sjenu' crne rupe koja je u središtu galaksije M87, a kolaboracije LIGO i Virgo detektirale su gravitacijske valove koji potječu od sudara manjih crnih rupa. Nadalje, uočeni bljeskovi infracrvenih i X-zraka iz područja Strijelca A\* konzistentni su s upadanjem materije u crnu rupu u središtu i predstavljaju dodatnu potvrdu za postojanje crne rupe u središtu.

---

## Buduća istraživanja

---

S daljnjim poboljšanjem rezolucije omogućit će se i preciznije mjerenje putanja promatranih zvijezda. Iz toga će se moći odrediti koliko precesiraju putanje (što opća teorija relativnosti predviđa). Nadalje, očekujemo da crna rupa u središtu rotira. Opća teorija relativnosti predviđa da kad crna rupa rotira ona povlači prostor oko sebe tako da i prostor prati njenu rotaciju. To će malo zanositi putanje promatranih zvijezda. (Slično i rotacija Zemlje zanosi za mali iznos putanje satelita.) Nadalje, iako je trenutno zaključak da je masa središnjeg objekta koncentrirana u malom prostoru, preciznija mjerenja će možda dati ograničenja na raspodjelu materije oko crne rupe. Pri tome će biti zanimljivo vidjeti mogu li se naći ograničenja na količinu tamne materije [5].

Što se potrebnih istraživanja na teorijskoj strani tiče, iako smo spomenuli da ne postoji drugi (ozbiljan) kandidat osim crne rupe, možemo pokušati istražiti hipotetske objekte koji ne sjaje i koji nemaju horizont. Takvi objekti nazivaju se egzotični kompaktni objekti. Svrha bi bila doznati mogu li eksperimenti opovrgnuti postojanje takvih objekata. Ako ih se može opovrgnuti to predstavlja dokaz više za crne rupe, a ako ne, to može potaknuti novi smjer istraživanja. O jednom tipu takvih objekata zvanom *gravastar*, pisalo se i u MFL-u [6]. Više o trenutnim istraživanjima egzotičnih kompaktnih objekata može se naći u [7].

Naravno, postoje i istraživanja same teorije. Očekujemo da kvantni efekti mijenjaju klasičnu Einsteinovu teoriju i donose korekcije, a zamislive su i korekcije koje nemaju veze s kvantnim efektima. Slično kako je Einsteinova teorija profinjenje Newtonove, pitamo se postoji li neka nova teorija koja bi bila profinjenje Einsteinove. Za sada nema eksperimentalnih dokaza za to, a očekuje se da će mjerenja svojstava crnih rupa moći pomoći rasvijetliti to pitanje.

---

## Literatura

---

- [1] Press release, *The Nobel Prize in Physics 2020.*, NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. Sat. 19 Dec 2020, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>
- [2] Advanced information, NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. Sat. 19 Dec 2020, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/advanced-information/>
- [3] BRIAN GREENE, SIR ROGER PENROSE, *World Science U Q+ A Session*, <https://www.youtube.com/watch?v=7oCQuvhQY6>
- [4] ANA BABIĆ, *Supermasivne crne rupe*, Matematičko-fizički list, Vol. 62 No. 248 (2012) 253–258, [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=354951](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=354951)
- [5] BRIAN GREENE, ANDREA GHEZ, *World Science U Q+ A Session*, <https://www.youtube.com/watch?v=GmXB7IqbM1o>
- [6] DUBRAVKO HORVAT, SAŠA ILJIĆ, *Gravastar protiv crne rupe*, Matematičko-fizički list, LVIII (2008), 3; 177–181.
- [7] VITOR CARDOSO, PAOLO PANI, *Testing the nature of dark compact objects: a status report*, Living Rev. Rel. **22** (2019) no. 1, 4 doi:10.1007/s41114-019-0020-4 [arXiv:1904.05363 [gr-qc]]. <https://arxiv.org/pdf/1904.05363.pdf>