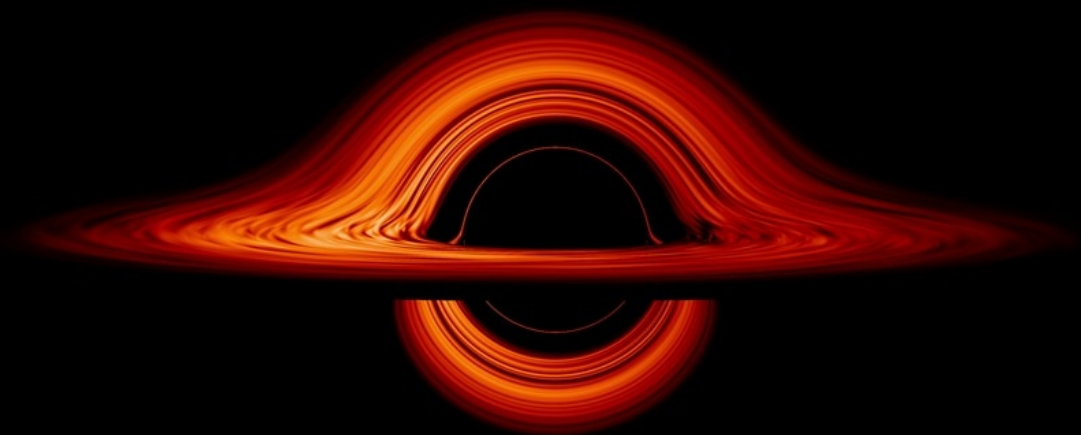


K O Z M O S

BESPLATNI VODIČ

CRNE RUPE

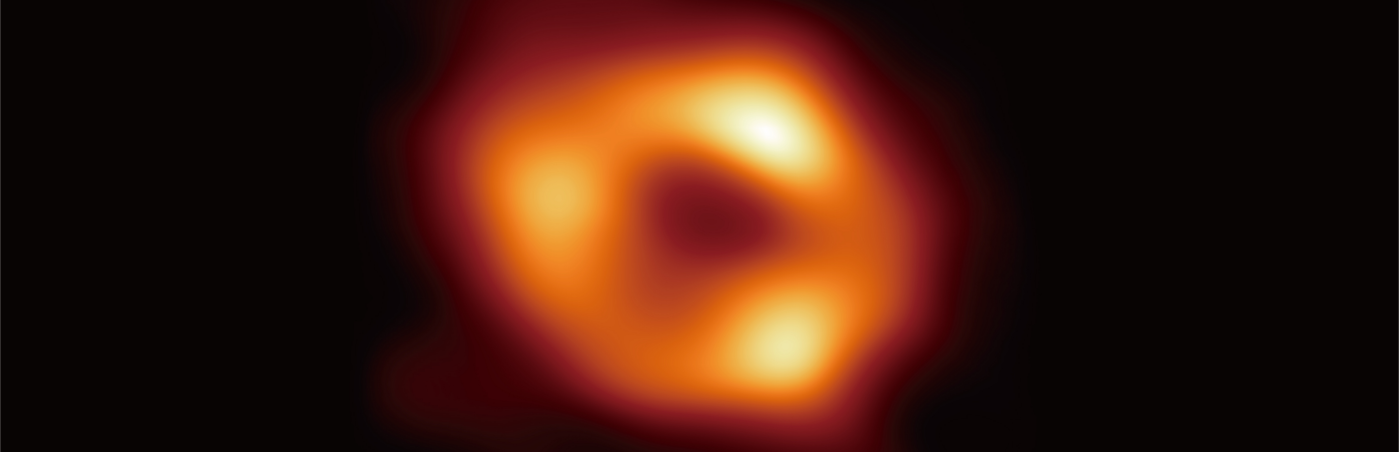


Što su i kako ih otkrivamo

Svemir, objašnjen jednostavno.

20 STRANICA · NA HRVATSKOM JEZIKU

Vizualizacija: NASA Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman.



Strijelac A* (Sagittarius A*, skraćeno Sgr A*): slika dobivena iz mjerenja mreže EHT, objavljena 2022. Izvor: EHT Collaboration; ESO, CC BY 4.0.

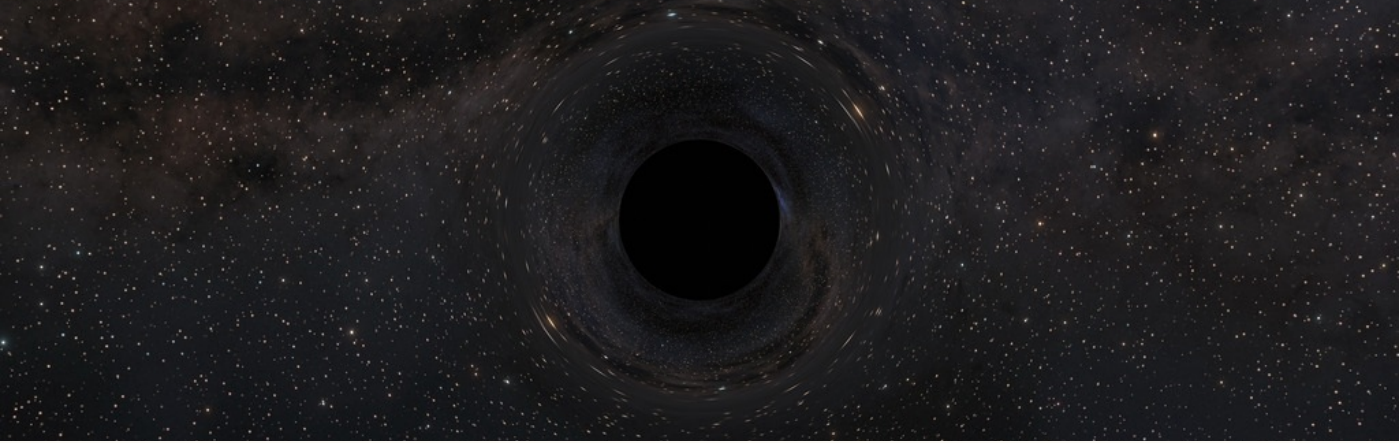
Kako nešto nevidljivo može biti stvarno?

U središtu naše galaksije zvijezde kruže oko nečega što ne vidimo. Astronomi su godinama pratili njihovo gibanje. Iz njihovih su putanja zaključili da se u vrlo malom području nalazi objekt približno četiri milijuna puta masivniji od Sunca. Najbolje objašnjenje za taj nevidljivi objekt jest crna rupa.

Crne rupe otkrivamo po onome što se događa oko njih. Njihova gravitacija utječe na gibanje zvijezda, a plin u njihovoj blizini može se toliko zagrijati da snažno zrači. U nekim smo slučajevima uspjeli snimiti i svijetli prsten oko tamnog središnjeg područja.

U ovom ćemo vodiču krenuti od jednostavnog pitanja: što je zapravo crna rupa? Zatim ćemo vidjeti kako nastaje, zašto njezina okolina može sjati i kako su astronomi prikupili dokaze o njezinu postojanju.

Za razumijevanje nisu potrebne formule. Priču ćemo pratiti od zvijezda i njihova razvoja do neobičnih pojava u blizini crnih rupa, a na kraju ćemo vidjeti na koja pitanja znanost još traži odgovore.



Crna rupa bez sjajnog diska, prikazana prema pojednostavnjenom modelu skretanja svjetlosti. Računalna vizualizacija: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC).

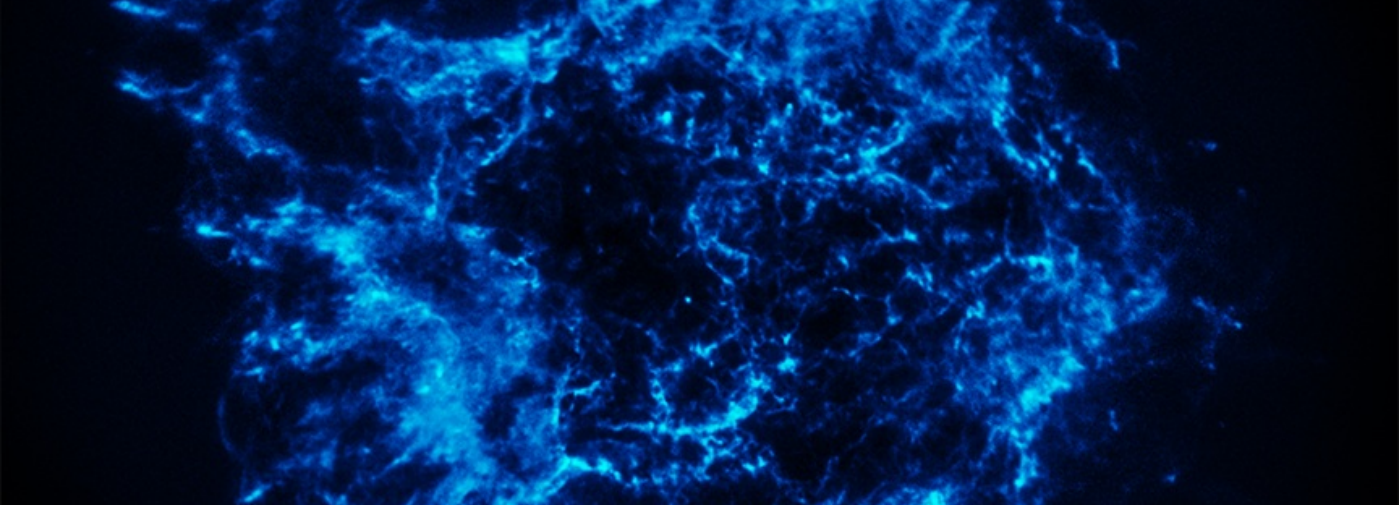
Što je zapravo crna rupa?

Crna rupa nastaje kada se golema masa sabije u toliko malo područje da iz njega više ne može pobjeći ni svjetlost. Zato ne možemo vidjeti što se događa u njezinoj unutrašnjosti.

Što je tijelo masivnije i što smo mu bliže, njegovo nas gravitacijsko privlačenje jače vuče. Kod crne rupe velika je masa sabijena u vrlo malo područje. Dovoljno blizu nje postoji granica unutar koje je gravitacija toliko snažna da ni svjetlost ne može pobjeći.

Tu granicu nazivamo horizontom događaja. Sve što je prijeđe, uključujući svjetlost, ostaje u crnoj rupi. Kada bismo je prešli, više ne bismo mogli poslati poruku nikome izvan nje.

Astronomi zato teleskopima proučavaju okolinu crne rupe. Gibanje zvijezda i zračenje plina otkrivaju svojstva objekta koji sam ostaje skriven.



Cassiopeia A, ostatak eksplodirane zvijezde u rendgenskom zračenju. U njegovu je središtu neutronska zvijezda. Snimka: NASA/CXC/SAO.

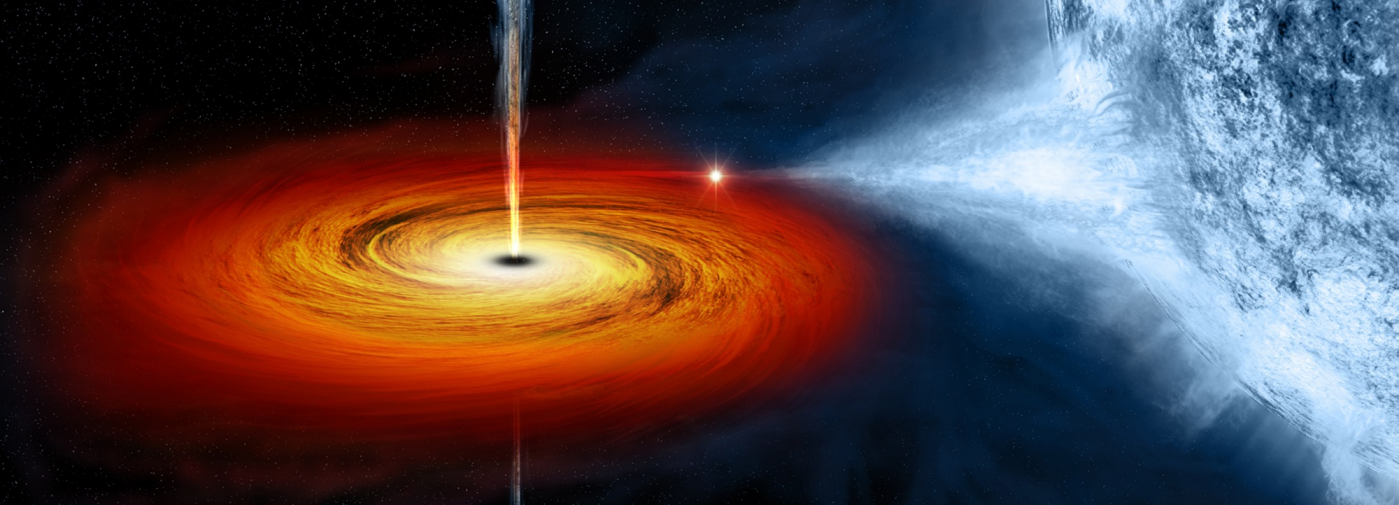
Kako od zvijezde nastane crna rupa?

Zvijezda je golema kugla vrućeg plina. Gravitacija privlači njezinu tvar prema središtu, a tlak u unutrašnjosti suprotstavlja se tom privlačenju. Energija koja se oslobađa u nuklearnim reakcijama pomaže održavati tu ravnotežu milijunima ili milijardama godina.

Kada vrlo masivna zvijezda iscrpi gorivo u jezgri, tlak više ne može zaustaviti njezino urušavanje pod vlastitom gravitacijom. Ako je preostala jezgra dovoljno masivna, nastaje crna rupa. Urušavanje može pratiti snažna eksplozija koja odbacuje vanjske slojeve zvijezde. Takvu eksploziju nazivamo supernovom.

Ne završava svaka masivna zvijezda na isti način. Nakon urušavanja može ostati i neutronska zvijezda, malen ostatak goleme gustoće. Ishod ovisi o masi jezgre i prethodnom razvoju zvijezde.

Naše Sunce nema dovoljno mase da bi postalo crna rupa. Nakon što prođe preostale faze razvoja i odbaci vanjske slojeve, od njega će ostati vruća jezgra koju nazivamo bijelim patuljkom.



Umjetnički prikaz sustava Cygnus X-1: crna rupa prikuplja dio plina sa zvijezde pratilje. Ilustracija: NASA, CXC, Melissa Weiss (CXC).

Koliko velika može biti?

Crne rupe nastale urušavanjem zvijezda obično imaju masu od nekoliko do nekoliko desetaka Sunčevih masa, a poznati su i masivniji primjeri. U središtima galaksija nalazimo crne rupe s milijunima ili milijardama Sunčevih masa. Njih nazivamo supermasivnim crnim rupama.

Masa i veličina nisu isto. Masa određuje gravitacijsko privlačenje, a veličinu crne rupe obično opisujemo promjerom područja omeđenog horizontom događaja, granicom iza koje nema povratka.

Primjerice, crna rupa deset puta masivnija od Sunca, ako se ne vrti, imala bi horizont promjera oko 60 kilometara. To znači da bi se masa deset zvijezda poput Sunca nalazila unutar područja širokog samo šezdesetak kilometara.

Što crna rupa ima veću masu, veći joj je i horizont događaja. Zato supermasivne crne rupe zauzimaju mnogo veće područje od onih nastalih urušavanjem zvijezda. I jedne i druge imaju granicu iza koje svjetlost više ne može izaći.

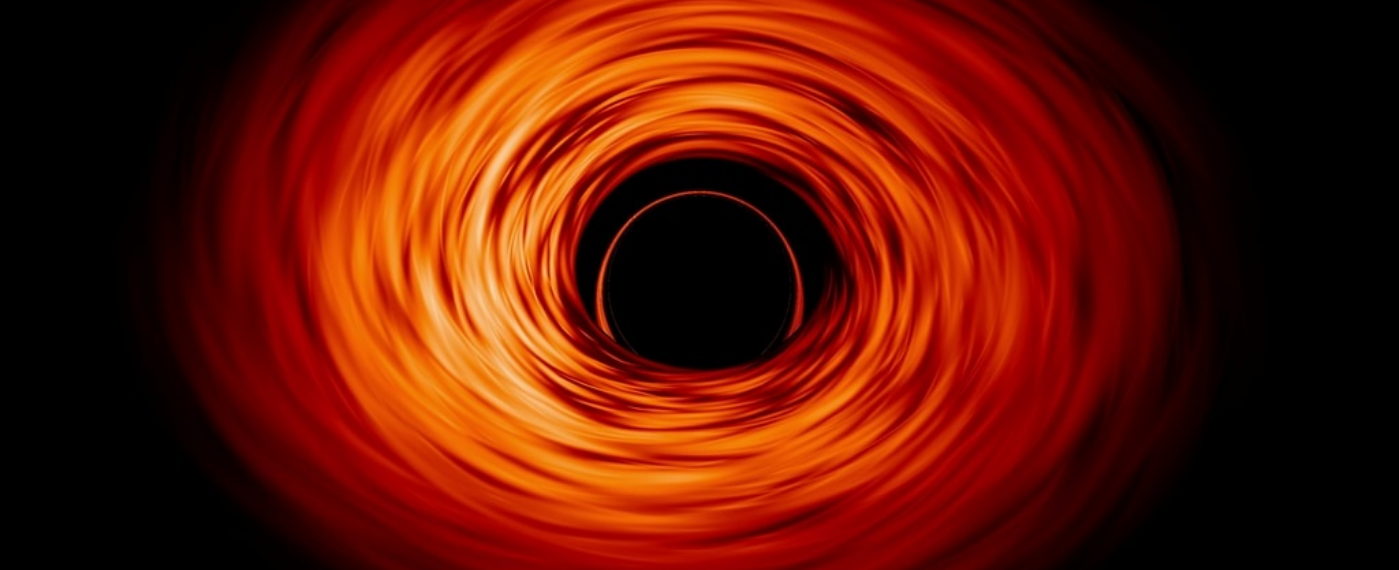
Bi li crna rupa progutala sve oko sebe?

Zvijezde mogu kružiti oko crne rupe, a da nikada ne padnu u nju. Njihove putanje ovise o masi crne rupe, udaljenosti od nje te brzini i smjeru gibanja. Upravo promatranjem tih putanja astronomi otkrivaju crne rupe.

Zamislimo da Sunce zamijenimo crnom rupom iste mase. Zemlja ne bi odjednom pala u nju. Na našoj bi udaljenosti gravitacijsko privlačenje ostalo jednako pa bi Zemlja nastavila kružiti. Nestale bi, naravno, Sunčeva svjetlost i toplina. To je samo zamišljena usporedba: Sunce se u stvarnosti ne može pretvoriti u crnu rupu.

Plin ili zvijezda mogu pasti u crnu rupu ako joj priđu dovoljno blizu i ako ih putanja vodi prema njoj. Dio okolnog materijala može dugo kružiti, a dio se može izbaciti u okolni svemir.

Prisutnost crne rupe u središtu galaksije zato ne znači da će cijela galaksija nestati u njoj. Većina zvijezda nalazi se daleko od središta, a na njihovo gibanje utječe i masa svih ostalih dijelova galaksije.



Računalna vizualizacija vrućeg diska oko crne rupe. Ovo nije teleskopska snimka. NASA Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman.

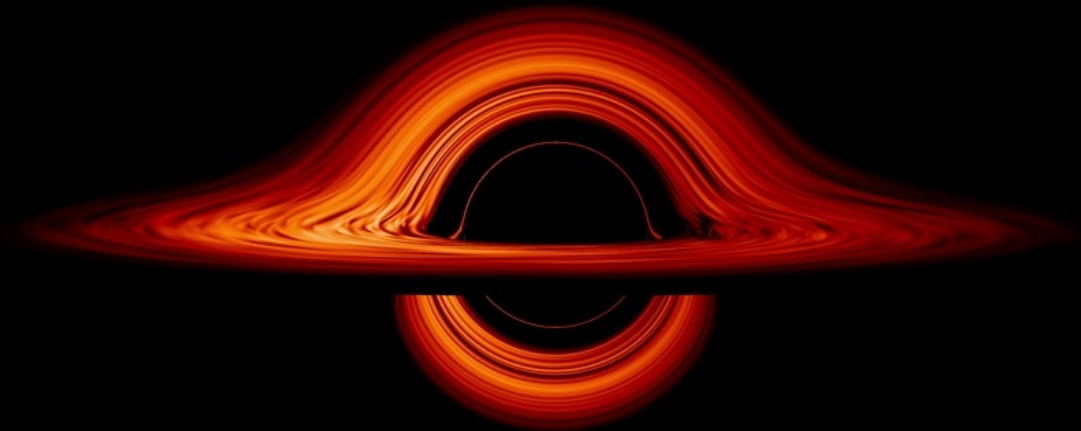
Zašto onda na slikama tako snažno sjaji?

Svjetlost koju vidimo dolazi iz okoline crne rupe. Plin koji joj se približava često kruži oko nje i oblikuje spljošteni disk. Dok se postupno kreće prema središtu, može se snažno zagrijati i emitirati golemu količinu zračenja.

Taj disk vrućeg plina nazivamo akrecijskim diskom. "Akrecija" znači nakupljanje tvari. Zračenje diska omogućuje nam da otkrijemo crnu rupu, iako iz njezine unutrašnjosti ne dopire svjetlost.

Boje na astronomskim slikama ne odgovaraju uvijek onome što bi vidjele naše oči. Neki teleskopi bilježe radiovalove ili rendgensko zračenje. Znanstvenici takva mjerenja prikazuju vidljivim bojama kako bismo lakše razlikovali pojedine dijelove prizora.

Nema svaka crna rupa sjajan disk. Ako u njezinoj blizini nema mnogo plina koji bi se mogao nakupljati, okolina može biti mnogo mirnija, a crnu je rupu teže otkriti.



Računalni prikaz pokazuje kako gravitacija mijenja sliku diska. NASA Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman.

Što je tamno područje u sredini?

Na prikazima crne rupe često vidimo tamno središnje područje okruženo svijetlim pojasom. Dio svjetlosti koja bi inače stigla do nas završava u crnoj rupi, dok drugim zrakama gravitacija mijenja putanju. Zbog toga nastaje neobičan prizor.

Gravitacija skreće svjetlost sa stražnje strane diska prema nama. Zato na slici izgleda kao da se dio diska podiže iznad crne rupe. Disk se zapravo ne savija na taj način; takav izgled nastaje zbog zakrivljenih putanja svjetlosti.

Tamno središnje područje astronomi nazivaju sjenom crne rupe. Zbog učinka gravitacije na svjetlost ono izgleda veće od horizonta događaja. Promjer tamnog kruga na slici zato nije jednak promjeru granice iza koje nema povratka.

Računalne vizualizacije pomažu nam razumjeti kako nastaje takav izgled. Teleskopske snimke uglavnom su znatno manje oštre jer prikazuju vrlo malo područje na golemoj udaljenosti.



M87*: slika rekonstruirana iz stvarnih mjerenja radiozračenja. EHT Collaboration; izvorna objava ESO/NASA, CC BY 4.0.

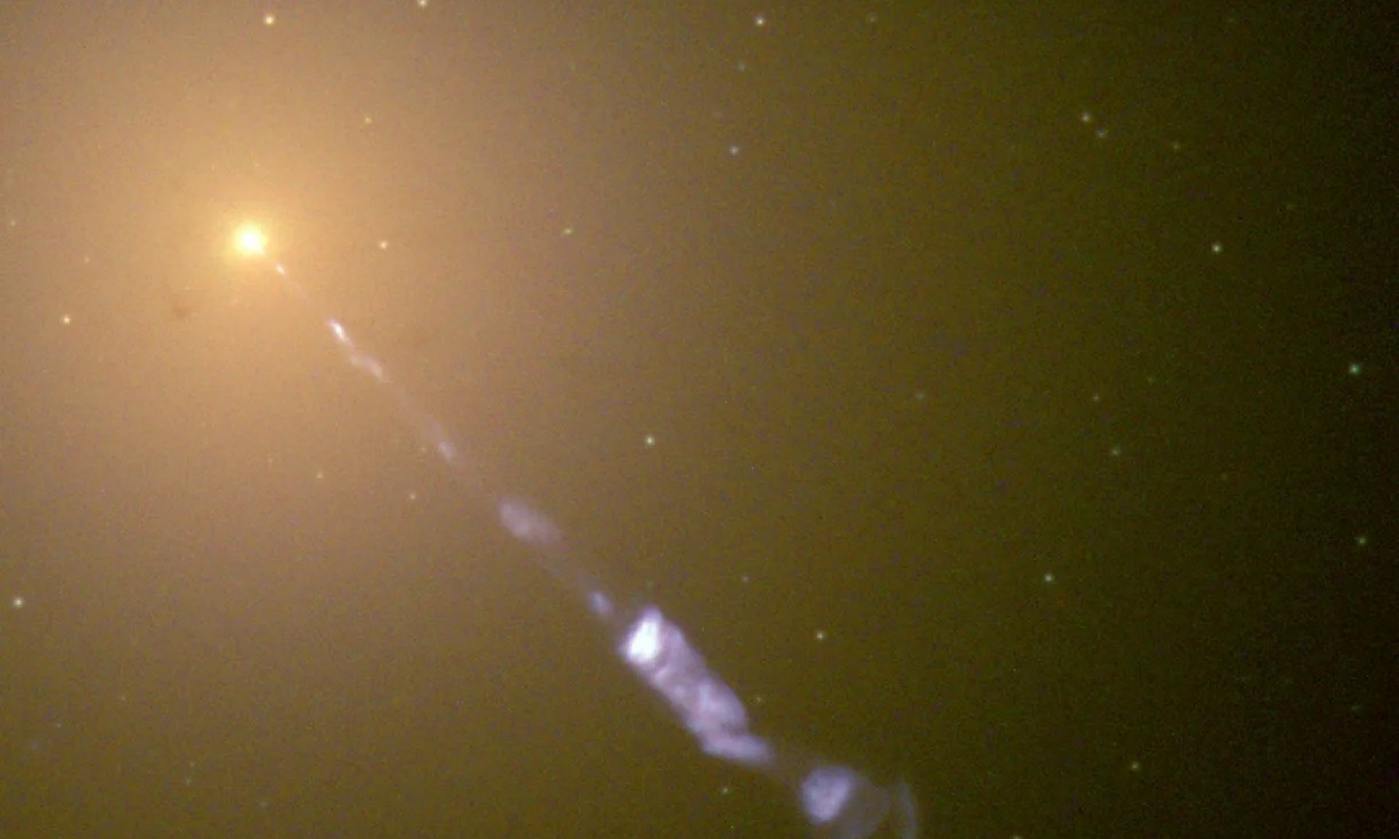
Kako su astronomi snimili prvu crnu rupu?

Godine 2019. objavljena je prva slika sjene crne rupe. Prikazuje M87*, crnu rupu u središtu galaksije Messier 87. Slika svijetlog prstena i tamnog središta dobivena je iz podataka koje je prikupila mreža radioteleskopa Event Horizon Telescope, skraćeno EHT.

Za to nije bio dovoljan jedan teleskop. Opservatoriji na različitim dijelovima Zemlje promatrali su isti objekt, a prikupljeni su podaci potom objedinjeni. Zahvaljujući velikim udaljenostima među teleskopima, mreža je mogla razaznati mnogo sitnije pojedinosti nego pojedinačni opservatorij.

Znanstvenici su iz tih mjerenja računalnim postupcima rekonstruirali sliku. Ona se zato razlikuje od fotografije snimljene običnom kamerom, ali temelji se na stvarnom zračenju koje je stiglo iz svemira.

Narančastim nijansama prikazana je jačina radiozračenja. Prsten otkriva sjajnu okolinu crne rupe, dok njezina unutrašnjost ostaje skrivena.



Hubbleova snimka galaksije M87 i njezina mlaza, izrez snimke. NASA i The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

M87*: div u dalekoj galaksiji

Galaksija Messier 87 udaljena je od nas oko 55 milijuna svjetlosnih godina. Svjetlost koju danas primamo iz nje putovala je do nas približno 55 milijuna godina. U njezinu se središtu nalazi crna rupa oko 6,5 milijardi puta masivnija od Sunca.

Na ovoj Hubbleovoj snimci vide se svijetlo središte galaksije i dugačak mlaz. Ona obuhvaća mnogo šire područje od slike narančastog prstena na prethodnoj stranici. Te dvije snimke pokazuju različite dijelove okoline iste crne rupe.

Mlaz se sastoji od čestica koje velikom brzinom odlaze iz područja u blizini crne rupe. Materijal se izbacuje iz njezine okoline, prije nego što prijeđe granicu iza koje nema povratka. U nastavku ćemo objasniti kako takvi mlazovi nastaju.



Šira okolica galaktičkog središta: Chandra, Hubble i Spitzer. NASA, ESA, SSC, CXC, STScI.

Strijelac A*: crna rupa u našoj galaksiji

I naša galaksija ima supermasivnu crnu rupu. Nalazi se u njezinu središtu, oko 26.000 svjetlosnih godina od Zemlje. Zovemo je Strijelac A*, a u međunarodnim se izvorima pojavljuje pod nazivom Sagittarius A*, skraćeno Sgr A*. Masa joj je približno četiri milijuna puta veća od Sunčeve.

Jedan od najvažnijih dokaza o njezinu postojanju pružile su obližnje zvijezde. Astronomi su godinama pratili njihove putanje i utvrdili da kruže oko vrlo masivnog objekta sabijenog u malo područje. Njihovo gibanje otkriva masu objekta koji ne vidimo.

Godine 2022. mreža EHT objavila je i sliku sjene crne rupe Strijelac A*. Ona je pružila dodatnu potvrdu onoga što su astronomi zaključili iz gibanja zvijezda.

Snimka na ovoj stranici prikazuje šire područje oko središta Mliječne staze. Sastavljena je od podataka triju svemirskih teleskopa i razlikuje se od EHT-ove slike sjene. Različite boje pomažu nam razaznati zvijezde, plin i prašinu u tom dijelu galaksije.



Zvijezda se rasteže pri bliskom prolasku kraj crne rupe. Kadar iz NASA-ine animacije. NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC).

Što bi se dogodilo da joj se približimo?

Opasnosti bi nas mogle dočekati mnogo prije nego što bismo stigli do crne rupe. Ako je okružuje vruć disk, snažno zračenje i užareni plin bili bi ozbiljna prijetnja. Približavanje mirnoj crnoj rupi bez takvog diska izgledalo bi drukčije.

Gravitacija može različito snažno privlačiti pojedine dijelove tijela. Kada biste prema crnoj rupi padali nogama naprijed, jače bi privlačila stopala nego glavu jer su joj stopala bliža. Zbog te bi se razlike tijelo rastezalo. To je učinak plimnih sila. One djeluju i na Zemlji: razlike u Mjesečevu i Sunčevu privlačenju uzrokuju plimu i oseku. U blizini crne rupe plimne sile mogu biti toliko snažne da razore zvijezdu.

Kod crnih rupa manje mase takvo rastezanje može postati pogubno već prije prelaska horizonta. Kod supermasivnih crnih rupa na samom horizontu može biti slabije, ali postaje sve snažnije kako se približavamo središtu.

Nakon prelaska horizonta događaja više nema povratka ni mogućnosti slanja poruke kući. O tome što se događa duboko u unutrašnjosti ne bismo mogli izvijestiti nikoga izvan crne rupe.



Umjetnički prikaz zvijezde S2 uz crnu rupu Strijelac A*. Veličine i promjene boje naglašene su radi prikaza. ESO/M. Kornmesser, CC BY 4.0.

Bi li ondje vrijeme prolazilo drukčije?

Zamislite dva jednaka sata. Jedan ostaje daleko od crne rupe, a drugi joj se približava. Pri usporedbi njihovih očitavanja mogli bismo otkriti da je svaki izmjerio drukčije trajanje istog putovanja. Na tu razliku utječu gravitacija i gibanje satova.

Osobi u blizini crne rupe vlastiti bi sat radio uobičajeno. Ne bi osjećala da joj vrijeme prolazi sporije. Razliku bi otkrila tek usporedbom svojeg sata sa satom udaljenog promatrača.

Kad bi netko padao prema crnoj rupi, udaljeni bi promatrač primao njegove svjetlosne signale u sve većim razmacima. Signali bi ujedno bili sve slabiji, a njihova bi svjetlost gubila energiju. Promatrač zato ne bi vidio jasan prizor prelaska horizonta.

Prema općoj teoriji relativnosti, osoba koja pada prešla bi horizont za konačno vrijeme izmjereno vlastitim satom. Njezino iskustvo zato se razlikuje od onoga što može vidjeti udaljeni promatrač. Do njega svjetlost stiže sve teže, dok osoba nastavlja padati.



Centaurus A u podacima Chandre, IXPE-a i ESO-a. NASA/MSFC/IXPE/S. Ehlert i sur.; NASA/CXC/SAO; ESO/WFI. Obrada: NASA/CXC/SAO/J. Schmidt.

Odakle dolaze golemi mlazovi?

Na snimkama nekih galaksija vidimo mlazove koji se protežu daleko od njihovih središta. Čestice u njima mogu putovati gotovo brzinom svjetlosti. Ti snažni mlazovi nastaju u okolini supermasivnih crnih rupa.

Ne mora sva tvar koja se približava crnoj rupi pasti u nju. Snažna magnetska polja u vrućem plinu mogu usmjeravati dio čestica i pomoći u njihovu izbacivanju iz središnjeg područja. Važnu ulogu može imati i vrtnja crne rupe.

Čestice u mlazu dolaze iz područja izvan horizonta događaja. Mlazovi, dakle, nastaju u okolini crne rupe, gdje čestice još mogu pobjeći u svemir.

Na ovoj snimci galaksije Centaurus A plavim je tonovima prikazan mlaz vidljiv u rendgenskom zračenju. Snimka je sastavljena od podataka više opservatorija i pokazuje kako aktivnost u blizini crne rupe može utjecati na mnogo šire područje.



Opservatorij LIGO u Hanfordu, snimljen iz zraka. Ovdje se laserskom svjetlošću mjere promjene udaljenosti. Caltech/MIT/LIGO Lab.

Što se dogodi kada se dvije crne rupe spoje?

Dvije crne rupe mogu kružiti jedna oko druge. Pritom gube energiju pa se postupno približavaju i kruže sve brže, dok se naposljetku ne spoje u jednu veću crnu rupu. Dio energije odlazi u svemir u obliku gravitacijskih valova.

Gravitacijski valovi šire se brzinom svjetlosti i neznatno rastežu i sažimaju prostor kroz koji prolaze. Na Zemlji detektori LIGO laserskom svjetlošću mjere iznimno male promjene udaljenosti koje ti valovi uzrokuju.

Prvi takav signal zabilježen je 14. rujna 2015. Nastao je spajanjem dviju crnih rupa. Znanstvenici su oblik izmjerene signala usporedili s izračunima koji opisuju takvo spajanje i tako utvrdili što ga je proizvelo.

Gravitacijski valovi omogućili su nam da svemir istražujemo na nov način. Teleskopi prikupljaju elektromagnetsko zračenje, primjerice vidljivu svjetlost, radiovalove i rendgensko zračenje. Detektori gravitacijskih valova mjere promjene udaljenosti koje nastaju pri prolasku valova. Tako otkrivamo i događaje koje ne prati snažan bljesak svjetlosti.

Kako crne rupe rastu?

Crna rupa dobiva na masi kada u nju padne plin, zvijezda ili druga tvar. Može rasti i spajanjem s drugim crnim rupama. Ipak, neće sva tvar iz njezine blizine završiti u njoj.

Plin često kruži oko crne rupe u disku. Zbog međudjelovanja s okolnim plinom i magnetskim poljima dio se plina postupno približava crnoj rupi. Pritom se može snažno zagrijavati i zračiti. Dio tvari može biti izbačen iz središnjeg područja umjesto da padne u crnu rupu.

Ti procesi mogu utjecati i na cijelu galaksiju. Energija oslobođena u okolini aktivne crne rupe može zagrijavati ili potiskivati plin iz kojeg nastaju nove zvijezde. Premda je crna rupa malena u usporedbi s galaksijom, njezin utjecaj može dosezati mnogo dalje od neposredne okoline.

Astronomi zato proučavaju i područje uz samu crnu rupu i udaljeniji plin. Tako pokušavaju otkriti kada crne rupe brzo rastu, kada su manje aktivne i kako je njihov rast povezan s razvojem galaksija.

Što još ne razumijemo?

Znamo mnogo o utjecaju crnih rupa na njihovu okolinu. Teže je odgovoriti na pitanje što se događa duboko u njima jer iz njihove unutrašnjosti ne može stići signal kojim bismo provjerili svoja objašnjenja.

U najjednostavnijem opisu crne rupe jednadžbe opće teorije relativnosti u njezinu središtu predviđaju beskonačnu gustoću. Takvo područje nazivamo singularnošću. Taj rezultat upućuje na to da je naš opis nepotpun. Znanstvenici zato pokušavaju povezati gravitaciju s kvantnom fizikom, koja opisuje pojave na vrlo malim razmjerima.

Stephen Hawking teorijski je pokazao da bi crne rupe zbog kvantnih učinaka trebale polako gubiti energiju. Tu pojavu nazivamo Hawkingovim zračenjem. Kod crnih rupa nastalih iz zvijezda ono bi bilo toliko slabo da ga dosad nismo izravno izmjerili.

Još ne znamo ni kako su neke crne rupe vrlo rano u povijesti svemira narasle do golemih masa. Novim opservacijama astronomi provjeravaju različita objašnjenja njihova nastanka i rasta. Proučavanje crnih rupa tako nam pomaže razumjeti galaksije, ali i provjeriti koliko dobro poznajemo zakone fizike.

Za one koji žele saznati više

Što su crne rupe i kako nastaju

NASA: pregled, građa i vrste crnih rupa.

Veličina i gravitacija

NASA Space Math: Black Hole Math.

Svjetlost oko crne rupe

NASA: objašnjenje vizualizacije akrecijskog diska.

Prva slika sjene M87*

Event Horizon Telescope: prvi rezultati za M87*, 2019.

Crna rupa u središtu Mliječne staze

ESO: objava slike Strijelca A*, 2022.

Gibanje zvijezda otkriva skrivenu masu

Nobelova nagrada za fiziku 2020.: popularno objašnjenje.

Pad i prolazak vremena

NASA: putovanje prema crnoj rupi u računalnoj simulaciji.

Spajanje dviju crnih rupa

LIGO: prvo opažanje gravitacijskih valova, GW150914.

Hawkingovo zračenje

Stephen Hawking: Particle creation by black holes, 1975.

O slikama u vodiču

Teleskopske snimke prikazuju stvarne opservacije. Boje često predstavljaju zračenje koje ljudsko oko ne vidi. Računalne vizualizacije pomažu objasniti pojave koje ne možemo snimiti izbliza. U potpisima je navedeno o kakvoj je slici riječ.

Naslovnica i disk oko crne rupe

NASA Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman. Računalne vizualizacije.

Cassiopeia A

NASA/CXC/SAO. Rendgenska snimka ostatka supernove.

Narančasti prsten M87*

EHT Collaboration; objava ESO/NASA. CC BY 4.0. Rekonstrukcija radiomjerenja.

Galaksija M87 i mlaz

NASA i The Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Hubbleova snimka, izrez.

Središte Mliječne staze

NASA, ESA, SSC, CXC, STScI. Podaci Chandre, Hubblea i Spitzera.

Plimno razaranje zvijezde

NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC). Kadar službene animacije.

Centaurus A

Rendgenski podaci: NASA/MSFC/IXPE/S. Ehler i sur.; NASA/CXC/SAO. Optički podaci: ESO/WFI. Obrada: NASA/CXC/SAO/J. Schmidt.

Strijelac A*

EHT Collaboration. Rekonstrukcija mjerenja radiozračenja, objavljena 2022. ESO, CC BY 4.0.

Crna rupa bez diska

NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC). Vizualizacija prema pojednostavnjenom modelu skretanja svjetlosti.

Cygnus X-1

NASA, CXC, Melissa Weiss (CXC). Umjetnička ilustracija crne rupe i zvijezde pratilje.

Zvijezda S2

ESO/M. Kornmesser. Umjetnička ilustracija, CC BY 4.0.

LIGO Hanford

Caltech/MIT/LIGO Lab. Fotografija opservatorija iz zraka.

Slike su izrezane radi prijeloma, bez dodavanja sadržaja. Kozmos.hr je izdavač vodiča; navedene znanstvene ustanove nisu njegovi pokrovitelji.

CC BY 4.0 · LIGO: uvjeti korištenja



KOZMOS

VODIČI ZA ZNATIŽELJNE

SVEMIR, KORAK PO KORAK

Nastavite istraživati.

Nove priče iz svemira, astronomije i znanosti čekaju vas na Kozmos.hr.

ČITAJTE NA KOZMOS.HR

Središte Mliječne staze: NASA, ESA, SSC, CXC, STScI.

Kozmos vodiči · Crne rupe · Listopad 2026.