

UKOLIKO BISMO USPELI DA JE KONSTRUIŠEMO, TEORIJA KVANTNE GRAVITACIJE BI PREDSTAVLJALA KRUNU LJUDSKOG POZNAVANJA I RAZUMEVANJA PRIRODE UOPŠTE. ONA BI PRUŽILA CELOVIT OPIS SVIH PRIRODNIH POJAVA U FIZICI.

Da li je gravitacija KVANTNA?

Četrnaesti septembar dve hiljade petnaest godine je upisan u kalendar velikih datuma savremene fizike. Naučnici su tog dana došli do prvog otkrića gravitacionih talasa, emitovanih pri sudaru dve crne rupe. Kruna je to „lude ideje“ grupe odvražnih istraživača sa univerziteta Kalteha i Masačusetskog instituta za tehnologiju (MIT), koji su oko projekta LIGO (Laserski interferometer opservatorije za gravitacione talase) okupili veliki broj ljudi, ustanova i univerziteta. I krajnje trnovitim putem stigli do cilja. Per aspera ad astra - rekao bi mudri Seneka. Od ideje o merenju do direktnе detekcije proteklo je gotovo pet decenija. Jedan učesnik eksperimenta na originalan način je opisao uspeh čitavog poduhvata: „Sve na čemu sam radio - to više nije naučna fantastika“.

Posle neočekivanog otkrića ubrzanog širenja svemira (1998) i uspeha u hajci na Higsov bozon (2012), takođe očekivana detekcija gravitacionih talasa treće je veliko otkriće u oblasti fundamentalnih fizičkih teorija u poslednjih dvadesetak godina. Šta bi danas rekao genijalni Ričard Fejnman (Richard Feynman) koji je bio skeptičan prema njihovoj detekciji. Kip Torn (Thor), jedan od tvoraca džinovskog laserskog detektora,

uz Ronu Drevera, sa Kalteha, i Reja Vajsu (Rainer Ray Weiss, MIT), bio je „najambiciozniji u pogledu uspeha projekta“ (B. Barish), najviše je lobirao da se napravi velika kolaboracija (oko 1000 istraživača i inženjera i 40.000 „amatera“), upravo u skladu sa onim što je pisao u svom članku o gravitaciji, 1973, 42 godine pre nego što je uspeo, da su fizičari „genijalci“ i da će „uz pomoć širokog dela laičke javnosti“ sve „prepreke biti prevaziđene“. Rad o prvom direktnom otkriću gravitacionih talasa publikovan je u prestižnom *Physical Review Letters*, februara 2016. Potvrđena je Ajnštajnova teorija, rođena gravitaciona astronomija, otvoreni novi prozor u razumevanju svemira. Ali pred fizičarima je i dalje davninski nerešen problem kako izmiriti opštu teoriju relativnosti i kvantnu mehaniku. Kako prevazići paradoks da je ostatak fizike kvantan, a gravitacija klasična? Da li je i gravitacija kvantna interakcija, glavno je pitanje na koje valja odgovoriti.

O gravitaciji uopšte, Njutnovoj i Ajnštajnovoj teoriji gravitacije, detektorima i detekciji gravitacionih talasa, njenom značaju za nauku, novim gravitacionim teleskopima, kvantnoj gravitaciji, kojom se i sam bavi (kvantna gravitacija na petljama), za *Planetu* govori dr Marko Vojinović, viši naučni saradnik Instituta za fiziku u Beogradu (Pančevo, 1978).

Od Aristotela do Ajnštajna

Priča o gravitaciji ima svoj prapočetak u Aristotelovim zakonima kretanja i geocentričnom pogledu na svet. On je pogrešno smatralo da, ukoliko je masa tela veća, ono neko rastojanje prelazi za kraće vreme ili da teža tela padaju brže nego lakša. Aristotelovo učenje o prirodi bilo je neprekisnovo sve do Keplera (*Johannes Kepler*, 1571-1630) i Galileja (*Galileo Galilei*, 1564-1642). Galileju je prvom palo na pamet da te zakone eksperimentalno proveri, dokazavši da svi predmeti koji su ispušteni sa iste visine, padaju za isto vreme, bez obzira na svoju veličinu. Ozbiljno intersetovanje nauke za pitanje gravitacije počinje tek sa Galilejem i Njutnom.

Citava grupa naučnika toga doba bavila se gravitacijom što eksperimentalno što teorijski, i svako je imao vlastitu ideju kako da se ona opiše i kakve su njene osobine. Isak Njutn (*Isaac Newton*, 1642-1727) je prvi među njima dao koherentnu sliku prirode i efektivno formulisao ozbiljnu teoriju obuhvativši sve relevantne osobine te pojave. Njutn je dao ujedinjenu sliku zemaljske i nebeske mehanike, istom silom je opisao zašto kamen pada ako ga bacimo uvis i zašto se planeti Sunčevog sistema

kreću oko Sunca. Bila je to prva unifikacija pojmljiva u fizici i prva revolucija u fizici - naglašava Vojinović.

To „prekrasno jedinstvo“, kako bi rekao Karlo Roveli, vladalo je do kraja XIX i početka XX veka. Fizika je predstavljala „zbir relativno usaglašenih zakona“ zasnovenih na „ključnim pojmljivima, kao što su vreme, prostor, uzročnost i materija“. Pojam prostora kakav leži u osnovi najrasprostranjenijeg viđenja sveta shvatan je slikevitko kao velika kruta kutija, za koju važi euklidovska geometrija, unutar koje se odvijaju svetska zbivanja.

U takvom prostoru Njutn je konstruisao svoju moćnu teoriju univerzalne gravitacije, koja je i danas osnov za mnogobrojne primene u svim oblastima tehnologije i inženjerstva. Čitava savremena inudstria, građevinarstvo i druge oblasti tehnike potvrda su zakona Njutnove mehanike. Ali krajem XIX veka pojavljuju se naučnici (J. C. Maxwell, M. Faraday, E. Mach) koji pronalaze nedostatke u njegovoj teoriji. Ernst Mah, austrijski fizičar i filozof, koji se posebno bavio pojmom inercije, imao je vodeću ulogu među njima. On je primetio da je pojam inercije u Njutnovoj mehanici nešto zadato *ad hoc* i zaključio da nam treba bolja i preciznija teorija gravitacije. Mahova kosmološka hipoteza je takođe značajno uticala na nastanak teorije relativnosti.

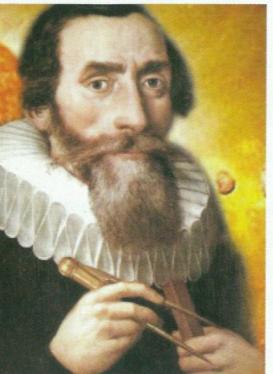
U isto vreme, kaže dr Vojinović, matematičar Bernard Riman (umro je vrlo mlad), student Karla Fridriha Gausa, prvi je došao na ideju da gravitaciju ne opisuje kao silu veća kao osobinu zakrivljenosti prostora. Gaus se inače bavio pojmom krivih površi (sfериčnih objekata), geometrijski je opisivao tu iskrivljenost i prvi je razradio u određenoj meri u matematici, a Riman uopštilo na apstraktnijem nivou. On je formulisao geometriju koji se bavi savremenim površima i zove njegovim imenom, Rimanova geometrija, ali nije uspeo da formulise odgovarajuću teoriju jer je nastojao da gravitaciju opiše kao zakrivljenost trodimenzionalnog prostora. Ovaj pojam je sam po sebi rđav pojam, i nije predstavljač čvrst temelj na kome je valjalo zidati modernu fiziku. Trebalo je da u ovom nauci dođe čudotvorna 1905. godina, da Albert Ajnštajn (*Einstein*, 1879-1955) objavi svoju *Specijalnu teoriju relativnosti* (STR), kojom u nauku uvodi pojam *prostovreme*, kao četvorodimenzionalnu strukturu i fundamentalni objekat u prirodi, pa da se dotadašnja fizika korenito promeni.

Teorija je plod čistog razmišljanja, primjenjenog na dotadašnja saznanja o svetu, kaže Roveli. Prostor, gravitaciona sila i polja - postaju „aspekti jednog jedinog entiteta: gravitacionog polja“.

Ajnštajn je napredovao u dva koraka: najpre je opis kretanja iz klasične mehanike učinio relativističkim, ali bez gravitacije (STR), a zatim je taj relativistički opis proširoj na kretanje tela pod uticajem gravitacije (OTR). Ajnštajn je, sa idejom da preformuliše Njutnov zakon gravitacije tako da bude u skladu sa STR, *de facto* primenio Rimanovu ideju opisa gravitacije kao zakrivljenosti, ali ne prostora, nego prostorvremena. Ta ideja je bila delotvorna i rođena je Opšta teorija relativnosti. Ne znam u kojoj meri je Ajnštajn kopirao Rimanu, a u kojoj meri je ona bila njegova sopstvena; svakako da je Bernard Riman bio prvi kome je tako nešto palo na pamet.

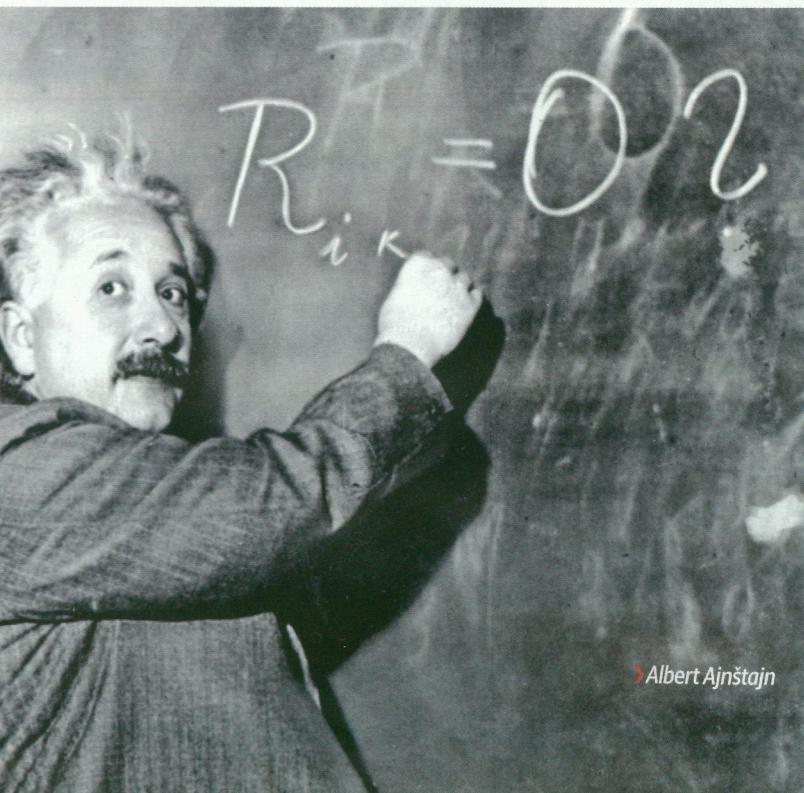
Foto-finiš „genija iz Ulma“

Za Opštu teoriju relativnosti se kaže da je „čisto krvna“ tvorevina Ajnštajnovog genija. „Genije iz Ulma“ je, naime, shvatio da su gravitaciono polje i Njut-



»Johannes Kepler

Aristotelovo učenje o prirodi bilo je neprekisnovo sve do Keplera (*Johannes Kepler*, 1571-1630) i Galileja (*Galileo Galilei*, 1564-1642). Galileju je prvom palo na pamet da te zakone eksperimentalno proveri, dokazavši da svi predmeti koji su ispušteni sa iste visine, padaju za isto vreme, bez obzira na svoju veličinu. Ozbiljno intersetovanje nauke za pitanje gravitacije počinje tek sa Galilejem i Njutnom.



»Albert Ajnštajn

nov prostor-kutija jedno te isto. Američki fizičar Daniel Kenefick (Kenefick), profesor u Arkanzasu, pita se u istoimenom članku marta ove godine: Da li je Ajnštajn prvi otkrio teoriju relativnosti (*Was Einstein the first to discover general relativity?*): Mogu li se Ajnštajnove jednačine zvati i Ajnštajn-Hilbertove jednačine? A ju na prošle godine objavljen je u *Cantor's Paradise* zanimljiv esej o trci dvojice naučnika, Ajnštajna i Hilberta, ko će prvi formulisati teoriju relativnosti (Jorgen Veisidal, *Who got there first?*).

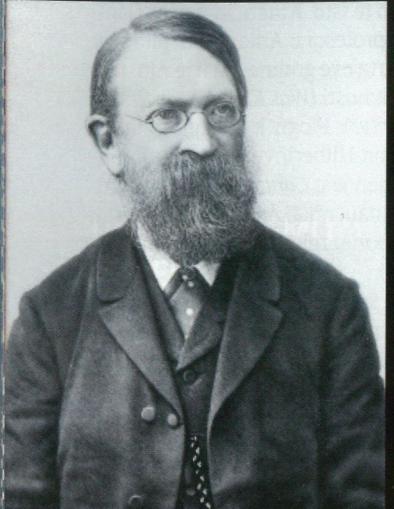
- Kada govorimo o *Specijalnoj teoriji relativnosti* i novoj teoriji gravitacije, moramo skrenuti pažnju sa romantizovane verzije da je Ajnštajn bio jedini koji je radio na toj teoriji. Ajnštajn nije bio jedini, on se trkao sa drugim naučnicima ko će prvi da formulise novu teoriju gravitacije. Glavni konkurent mu je bio David Hilbert (1862-1943) koji je, gotovo u isto vreme kada i on, formulisao teoriju relativnosti, ali je malo zakasnio sa objavljinjanjem rada. Ajnštajn je prvi u jesen 1915. predstavio svoju teoriju a naredne godine prvi objavio rad o Opštoj teoriji relativnosti. Hilbert je nezavisno od Ajnštajna došao do iste teorije, bukvalno su se trkali, Ajnštajn ga je prestigao u foto-finišu. Nisu samo njih dvojica radili na tome. Kao i u Njutnovu vreme, postojala je grupa naučnika koncentrisana na taj problem i smatrali su to pitanje značajnim. Od njih mi danas pamtimo samo Ajnštajna, kao što pamtim i Njutna, ali treba da znamo da oni nisu bili sami.

Ajnštajn je imao nekoliko razloga da formulise svoju teoriju, a glavni je bio taj da pokaže kompatibilnost gravitacionog polja sa *Specijalnom teorijom relativnosti*. U toku razvoja teorije ispostavilo se da ona na izvestan način razrešava i sve one probleme na koje je ukazivao Ernst Mah (s kojim se Ajnštajn inače dopisivalo - nap. a.), govoreći o nedostacima Njutnove teorije. Opšta teorija relativnosti je ne samo nadogradila i uopštila Njutnovu teoriju gravitacije nego i čitavu Njutnovu mehaniku, koja se pokazala da nije univerzalna već aproksimativna.

- Ajnštajn kaže da ništa ne može da se kreće brže od svetlosti, odnosno da je brzina svelosti invarijanta, iz čega se zaključuje da svaki drugi kretanje ima manju



»Dr Marko Vojinović, viši naučni saradnik Instituta za fiziku u Beogradu, Grupa za proučavanje gravitacije, čestica i polja



Ernst Mach

INFORMACIJA O PROMENI GRAVITACIONOG POLJA KOJA SE PROSTIRE OD JEDNOG TELA KA DRUGOM BRZINOM SVETLOSTI ZOVE SE GRAVITACIONI TALAS. DRUGIM REČIMA, GRAVITACIONI TALAS JE TIP PROMENE GRAVITACIONOG POLJA KROZ PROSTOR KAKO VREME ODMIČE.

brzinu, odnosno da je vrlo komplikovano da ima veću brzinu od brzine svetlosti. Pošto postoji fundamentalno ograničenje brzine prostiranja interakcija u prirodi, ako jedno telo prilično udaljeno od drugog pomerimo, pomeranje će u duhu Njutnovе fizike izazvati promenu gravitacione sile kojom to telо deluje na drugo telо. Postavlja se pitanje: u kom trenutku? U Njutnovoj teoriji dejstvo na daljinu je trenutno, gravitaciona sila se promeni istovremeno kada je izazvano pomeranje prvog tela. U STR to nije moguće, zato što je pojam istovremenosti suštinski drugačije definisan, odnosno Njutn ga je loše definisao.

Prema Ajnštajnovoj teoriji, sve interakcije se prostiru konačnom brzinom. Kada pomerimo neko telо, potrebno je da prođe izvesno vreme dok informacija o promeni gravitacione sile stigne do drugog tela. Ta informacija o promeni gravitacionog polja koja se prostire od jednog tela ka drugom brzinom svetlosti zove se *gravitacioni talas*. Drugim rečima, gravitacioni talas je tip promene gravitacionog polja kroz prostor kako vreme odmiče.

Kao što su vodeni talasi oscilatorno kretanje kroz prostor, gravitacioni talasi predstavljaju oscilacije pojma rastojanja. Rastojanje između dve tačke u prostoru menja se sa vremenom. Informacija od jednog tela stiže talasanjem do drugog. I koliko znamo za sada, oni se prostiru brzinom vrlo bliskom brzini svetlosti, što je očekivano. Teorija relativnosti predviđa da je ona jednaka brzini svetlosti, ali to treba proveriti. Da bismo imali baš precizan osećaj šta se u svemu rečenom dogada, mora se jednostavno znati matematika.

- Opšta teorija relativnosti je Ajnštajnova teorija gravitacije. Ona ukazuje na prostor, vreme, simultanost. Njena osnovna uloga je pre svega da opiše gravitaciono polje i gravitacione pojave uopšte. Sama reč *gravitacija* se ne spominje u iskazu OTR, ona je u stvari teorija gravitacionog polja. Fizičar to poima automatski, ali oni koji nisu fizičari pitaju se kakve veze OTR imaju sa gravitacijom.

Ako se konačno, zahvaljujući Ajnštajnu, znalo da gravitacioni talasi postoje (on ih je predviđao u radu *Über die Gravitationswellen* iz 1918), mada se za njih znalo u nauči i ranije, nameće se pitanje: zašto su oni otkriveni tek poslednjih godina? Odgovor može biti jednostavan: gravitacioni talas je veoma slab, gotovo neuhvatljiv. To je posledica činjenice da je sama gravitacija veoma slaba sila, od svih poznatih sila u prirodi daleko najslabija, toliko slaba da je njen uticaj značajan samo kada je uticaj svih ostalih zanemarljiv. Ali to je samo deo odgovora. Sama teorija opšte relativnosti, iako se, još od Arutura Edingtona 1919, mnogo puta pokazala tačna, nosila je sobom i probleme, od kojih je jedan bio *samo postojanje* gravitacionih talasa. Ni sam Ajnštajn nije bio siguran u njihovo postojanje i naučna zajednica je dugo delila njegovu nesigurnost tako da su neki naučnici smatrali da je gravitacione talase bezmal nemoguće detektovati.

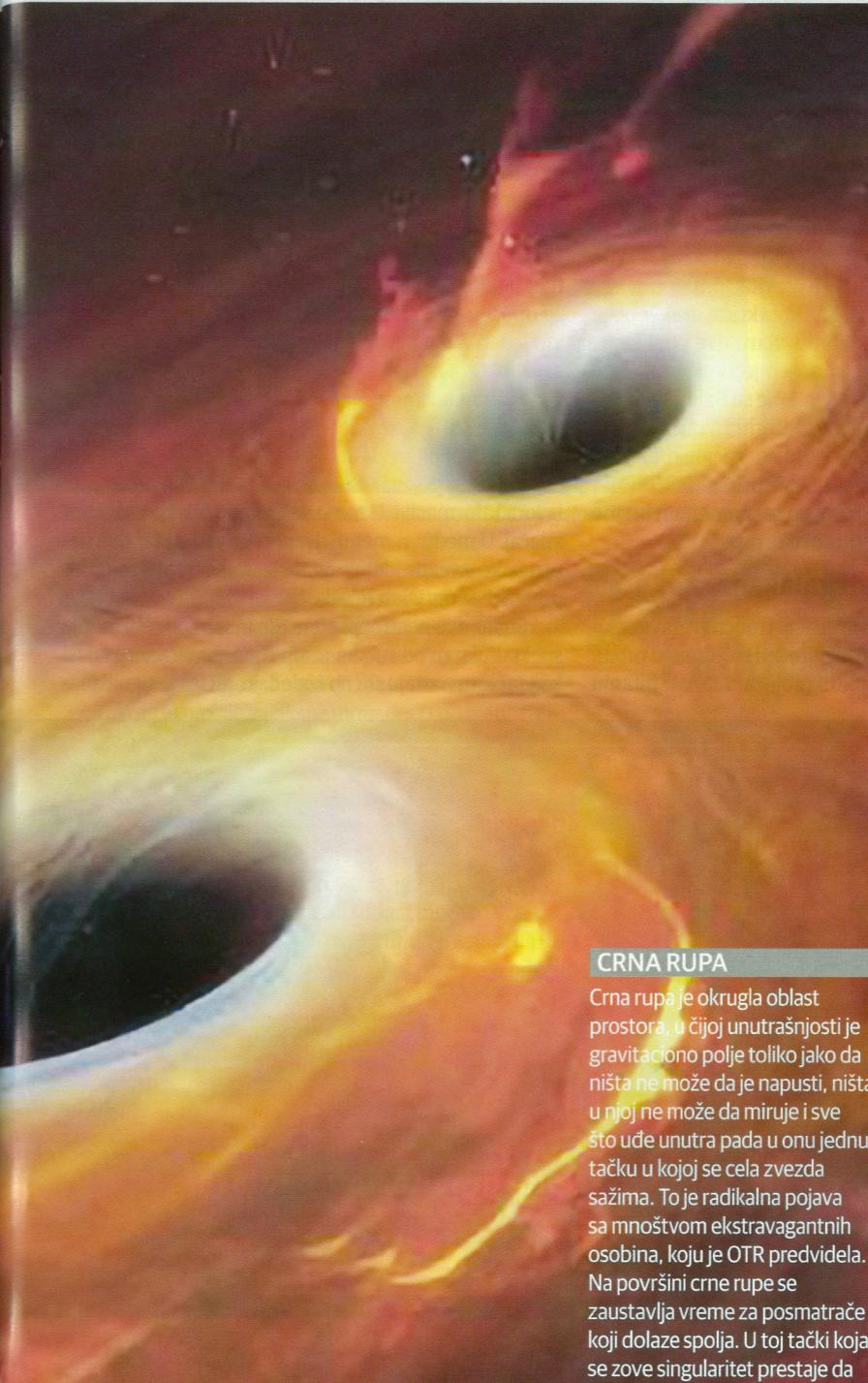
Od ideje o merenju do otkrića

Opšte je prihvaćeno mišljenje da se prelomni trenutak, koji je doveo do otkrićа, dogodio 1957, kada je engleski fizičar Feliks Pitani shvatio na koji bi način plimske sile u Opštoj teoriji relativnosti (kao proces uđisaja i izdizanja čitavog Univerzuma) mogle da daju fizički smislen signal dovoljno jak da se može detektovati sa Zemlje (Pi-

rani nije dočekao potvrdu svojih napora, umro krajem 2015). Pokušaj Džozefa Vebera tokom šezdesetih, iako po rezultatu neuspisan, doveo je do obnove interesovanja za gravitacione talase i opštu relativnost.

Najvažniji napredak ostvaren je 1974. kada su Džozef Taylor (Taylor) i njegov student Rasel Alan Hulse (Hulse), koristeći radio teleskop u Aresibo opservatoriju u Portoriku, otkrili prvi *binarni pulsar*, u kom pulsar ima zvezdu-saputnika, najčešće je to još jedna neutronska zvezda. Promene u rotaciji pulsara su se savršeno uklapale u Ajnštajnova predviđanja. Bilo je to prvo posredno otkriće da gravitacioni talasi postoje.

Nešto ranije Rajner Vajs, eksperimentalni fizičara sa MIT-a, spremajući kurs predavanja o teoriji relativnosti, došao je na ideju da se deformacija prostora koju izaziva gravitacioni talas meri laserskim interferome-



CRNA RUPA

Crna rupa je okrugla oblast prostora, u čijoj unutrašnjosti je gravitaciono polje toliko jako da ništa ne može da je napusti, ništa u njoj ne može da miruje i sve što uđe unutra pada u onu jednu tačku u kojoj se cela zvezda sažima. To je radikalna pojava sa mnoštvom ekstravagančnih osobina, koju je OTR predviđala. Na površini crne rupe se zastavlja vreme za posmatrače koji dolaze spolja. U toj tački koja se zove singularitet prestaje da važi, uslovno rečeno, i opšta teorija relativnosti, kaže Marko Vojinović i podvlači:

- Mi ne znamo kako treba da radi fizika na tim najmanjim rastojanjima. To je oblast kojom se ja bavim, opis gravitacionih pojava na malim rastojanjima, na kvantnim skalama. Crna rupa kao finalni stadijum evolucije teških zvezda, izuzetno je kompaktna, prečnika nekoliko kilometara, srazmerna je masi zvezde od koje je nastala. Ovaj astrofizički objekat ima izuzetno radikalne osobine. Osnovne su: masa i moment impulsa, koliko je težak i koliko se brzo vrti.

živanja". Bariš je, pored onih iz SAD, uspeo da u projekt uključio stručnjak iz 20 zemalja. Zasnovan na interakciji teorije i eksperimenta, LIGO je imao više izgleda na uspeh, bila je to dobitna kombinacija. U poodmakloj fazi razvoja, CERN je mogao da im bude dobar primer.

Sagrađena su dva velika laserska interferometra, jedan u Livingstonu (u Luizijani), drugi u Hanfordu u državi Vašington, na američkom severozapadu, na rastojanji od 3000 km. „Detektori su pušteni u rad 2005. Narednih godina prikupili su veliki broj podataka, ali nisu bili dovoljno osetljivi da bi otkrili gravitacione talase“, ispričao je za *Glas Amerike*, pre dve godine, Vuk Mandić sa Univerziteta Minesote, čija je grupa duže od jedne decenije deo kolaboracije, u kojoj Srbija nije učestvovala - inače rođen u Priboru. On je naveo da su, to-

kom petogodišnje pauze (2010-2015), postavljeni novi, osjetljiviji i precizniji instrumenti, zbog čega je ova prva opservatorija za gravitacione talase nazvana „unapredeni“ LIGO (*Advanced LIGO*). Detektori koji danas funkcionišu su ostali na istim lokacijama.

- Na osnovu slike pojma gravitacionog talasa kao talasanja, objašnjava dr Vojinović, definiše se i način na koji možemo da merimo gravitacione talase, što je urađeno u LIGO eksperimentu. Ideja eksperimentalne koncepcije gravitacionih talasa se bazira na pojmu oscilovanja rastojanja. Ako dva tела stavimo jedno naspram drugog i precizno laserski merimo rastojanje između njih možemo da izmerimo kako se ono menja protokom vremena. Pri tom je važno obezbediti da ogledala budu potpuno izolovana od uticaja svih mogućih sila koje mogu da ih zatrebu, jer je gravitacioni talas veoma slab, gotovo neuhvatljiv. To je posledica činjenice da je sama gravitacija veoma slaba sila.

Postrojenja u Livingstonu i Hanfordu na oba kraka sadrže po dva para ogledala i posmatra se interferencija talasa dva laserska zraka. Na jednom kraku se, između dva ogledala, odbije jedan zrak, na drugom drugi, zatim se ta dva zraka na kraju rekomobinuju (spajaju) na polupropusnom ogledalu, posmatra se njihova promena u fazu i ta promena daje informaciju o relativnom rastojanju između jednog i drugog para ogledala. Kada se dva ogledala u jednom kraku približe, u drugom kraku se udalje i obrnutu. To tako karakteristično oscilovanje koje ljudi dva ogledala je ono što je opbservabilno, potpis prolaza gravitacionog talasa. To se zove *gravitaciono zračenje*, koje je po svom karakteru *kvadrupolno*, za razliku od svetlosti koja je dipolna.

Izvori gravitacionih talasa su astrofizičkog porekla, izvan naše galaksije. I kada se veoma slaba sila prostire na veoma dalekom rastojanju, dobijamo isti takav efekat, što je po svojoj prirodi vrlo komplikovano meriti. Merenje usložnjavaši šumovi najrazličitijeg porekla: od zemljotresa, preko atmosferskih pojava, prolaza vozila pored laboratorije do šumova koji proizilaze iz Hajzenbergovih relacija neodređenosti u kvantnoj mehanici, kretanja elektrona oko jezgara u atomima, temperature samih ogledala... Svi ti šumovi su po intenzitetu veći od signala koji treba izmeriti. Eliminisati sve te šumove, da bismo prepoznali signal, izuzetno je teško, kaže dr Vojinović i naglašava:

- Čitava tehnologija LIGO i drugih eksperimenta koji se bave detekcijom gravitacionih talasa podređena je eliminaciji svih šumova da bismo signal mogli jasno da prepoznamo. U tu svrhu, LIGO je i repliciran na dve lokacije. Oba instrumenta moraju da detektuju istovetnu pojavu u približno istom ali ne i potpuno identičnom trenutku, s obzirom da je rastojanje između dve lokacije oko 3000 km i da gravitacioni talasi putuju konačnom brzinom.

Kada su istraživači detektovali prvi gravitacioni talas, prvo im je pao na pamet da provere da li signalne poticje od nekog šuma. U tom trenutku je u Južnoj Africi besnela oluja, pa se najpre pristupilo proveri nisu li atmosferska elektromagnetska pražnjenja (munje, gromovi) u toku tog nevremena izazvala registrirane signale na drugom kraju planete.

Položaj gravitacionih teleskopa na Zemlji, objašnjava Vojinović, takođe je veoma važan jer su izvori gravitacionih talasa van Sunčevog sistema. Pošto je Zemlja okrugla, različito orijentisani detektori vide gravi-

tacioni talasi na različite načine. Ako dva detektora leže u ravнима koje su pod uglom, i na jedan detektor gravitacioni talas pada okomito - na drugi pada iskošeno. Upravo zbog toga što su orijentisani na različite načine, lako je uporediti da li su signali koje oni hvataju kompatibilni sa postojanjem istog talasa. U suprotnom može se zaključiti da signal nije gravitacioni talas nego je šum, ali ako vide isti signal, to je još jedan od načina da se eliminšu svi efekti koji nisu gravitacioni.

Naučnici su prilikom prvog otkrića, frekvencije gravitacionih talasa nastalih u sudaru dve crne rupe, pretvorili u zvučne talase i dobijen je zvuk, „zujuće“, kako kaže Alan Adams sa MIT-a, koje su fizičari odmah nazvali *čirp* (engl. *chirp* = cvrkut, čurlik), i taj „zvuk“ je reprodukovana na promociji otkrića u Nacionalnoj fondaciji za nauku u Vašingtonu, 11. februara 2016. Ton i jačina te čujne poruke se menjaju sa promenom brzine kojom crne rupe kruže jedna oko druge.

Detektori na skali galaksije

U izgradnji su znatno drugačiji i moćniji gravitacioni teleskopi od postojećih. Oni će biti smešteni u orbiti. Takav je glavni međunarodni projekat LISA. U pitanju

je nazvali su ih *kvakari*; ali kada su razumeli njihov mehanizam, shvatili su da je reč o supermasivnim crnim rupama, objašnjava naš sagovornik.

Neutronske zvezde su drugi krajnji studijum evolucije zvezda, manje su masivne, ali dovoljno kompakte. Binarne neutronske zvezde imaju malo rastojanje, dovoljno veliku težinu i mogu da budu efektivni izvor gravitacionih talasa. One sijaju i možemo ih videti optičkim teleskopima, za razliku od crnih rupa koje su mračne i nevidljive. LIGO eksperiment je 2017. objavio jedan rad o prvoj detekciji sudara dve neutronske zvezde. Ova pojava je detektovna i optičkim teleskopom i gravitacionim interferometrom, što je početak *multi-messenger astronomije*. Ovaj sudar dve neutronske zvezde, koliko znamo, do sada je prvi i jedini slučaj da je ista pojava otkrivena pomoću dva nezavisna izvora informacija. U tome se i sastoji njegov izuzetan značaj. U međuvremenu, drugi otkriven sudar dve neutronske zvezde detektovan je samo gravitacionim putem, bez optičkih teleskopa.

Sudar dve neutronske zvezde je sam po sebi manje spektakularan od sudara crnih rupa; gravitacioni talasi koji pri tom nastaju slično izgledaju, ali im je signal ma-



Opervatorije za praćenje gravitacionih talasa LIGO Livingston (levo) i LIGO Hanford



(desno)



Teorijski je moguće i sudar crne rupe s neutronskom zvezdom, ali to još niko nije video niti registrovao. Iz nekog zasad nepoznatog razloga takvi sistemi su znatno ređi nego sistemi dve crne rupe ili dve neutronske zvezde. Statistički je moguće da takvi sistemi postoje.

Tokom evolucije galaksije može doći i do njenog sudara s drugom galaksijom. Kako svaka u sebi ima supermasivnu crnu rupu, može se prepostaviti mogući sudar dve tako ogromne crne rupe. Takav sudar bi se dogodio na nižim frekvencijama od gorepomenutih. Obične crne rupe su male i mogu brzo da se vrte jedna oko druge, supermasivne se vrte sporo ali se brže sudaraju nego obične, a pošto je frekvencija tih sudara mnogo niža, sadašnji detektori ne mogu da ih registruju. Mogao bi da ih „ulovi“ detektor koji bi bio napravljen od satelita u orbiti Sunca, jer bi mogao da meri mnogo veća rastojanja i sašim tim i takve izvore gravitacionih talasa.

Treći tip detektora radi na skali cele naše galaksije. Zvezde zvane *pulsar* vrte se na određeni način tako da svetlost koja od njih dolazi pulsira, u jednom trenutku je jača u drugom slabija. Te pulsacije su izuzetno pravilne, ravnomerne i tačne. Zvezde-pulsari su rasute na našem nebu i moguće ih je pronaći; ako bismo ih pronašli u dovoljno velikom broju, merenjem njihovog pulsiranja možemo da rekonstruјemo geometriju položaja u koome se nalaze, koliko su daleko jedne od drugih itd. Ako možemo da njihove pulsacije merimo dovoljno preci-

zno, možemo da izmerimo rastojanje između njih; a kada to znamo, možemo da merimo i promene u periodima pulsiranja. Teorijski, one mogu da nam daju informaciju o nekom gravitacionom talasu koji pada na celiu našu galaksiju i zaljuljava pulsare jedne u odnosu na druge. Frapantno zvuči da cela naša galaksija igra ulogu jednog džinovskog detektora gravitacionih talasa.

Planiraju se eksperimenti koji se baziraju na detektorima koji vrlo precizno mere rastojanja samih pulsara. To su radioteleskopi, koji su upereni prema pulsaru i pomoću atomskog časovnika mere pulsacije. Za to je potrebna čitava mreža radioteleskopa, a prilično komplikovanom jednačinom obradivanja dobijenih podataka mogli bismo da merimo promenu rastojanja između pulsara i detektujemo gravitacione talase koji imaju još mnogo manju frekvenciju od onih koji nastaju u sudaru kvazara.

Izvori gravitacionih talasa

Istraživači su još od nastanka Opštete teorije relativnosti teorijski proučavali izvore gravitacionih talasa. Osnovni izvori su dinamički binarni sistemi velikih masa i dimenzija, koji imaju više sunaca i još veći broj planeta nego što je to slučaj sa našim Sunčevim sistemom: dvojne neutronske zvezde, dvojne crne rupe, supermasivne crne rupe, Veliki prasak. U najprostijem slučaju, dve zvezde koje se vrte jedna oko druge. Ta rotacija emituje gravitacione talase i to je ono što se zove *izvor*. Svi izvori čije signale možemo da otkrijemo, merimo i umeemo da prepoznamo su u manjoj ili većoj meri tog tipa. Moguće je da postoji složeniji izvor složenijih gravitacionih talasa, ali mi još ne umemo da prepoznamo njihov signal jer ne znamo kako izgledaju.

Najveću količinu gravitacionih talasa i najvišeg intenziteta daju parovi crnih rupa i neutronske zvezde (hipotetička) kombinacija neutronske zvezde i crne rupе. Ima i drugih izvora koje su naučnici videli na nebu optičkim metodama, i u izvesnoj meri mogu da ocene njihov broj. Što se crnih rupa tiče, nije se znalo da li one uopšte postoje. Očekivalo se da ih ima, ali nije bilo jasno koliko, jer su optički nevidljive.

Šta je zapravo crna rupa? Jedan od mogućih krajnjih stadijuma evolucije zvezde. Zvezda je okruglo telo koje ima veliku masu, kaže dr Vojinović, zbog čega je njen gravitaciono polje vrlo jako. Gravitacija pokušava da sažme zvezdu u jednu tačku, čemu se opiru od nje jača elektromagnetsna i nuklearna sila. Ali kako je gravitaci-

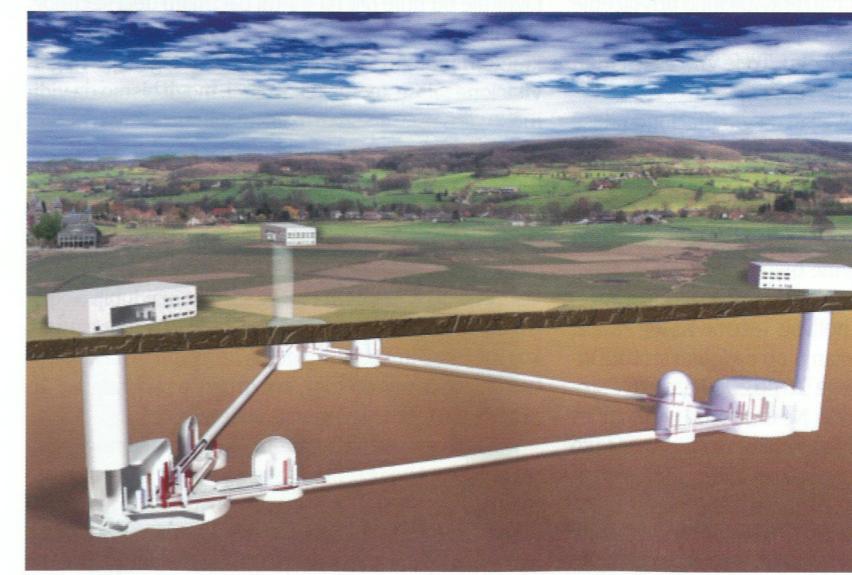
MREŽA ZEMALJSKIH DETEKTORA

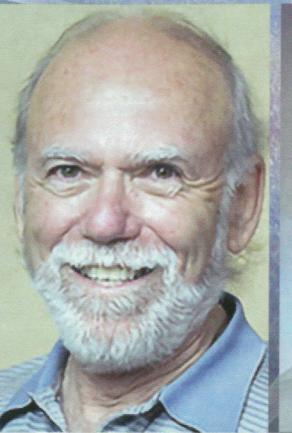
Američki unapredeni LIGO je već ušao u istoriju i sa uspehom nastavlja svoju misiju, zajedno s drugim kolaboracijama. Mreža zemaljskih detektora sa sve većom rezolucijom i osetljivošću (povećana i do 20 puta za niske radio frekvencije) širi se Evropom (*Advanced Virgo*), Japanom (*KAGRA*), između Amerike i Indije (*LIGO-India*), činiće moćne resurse u razumevanju nastanka našeg univerzuma. Kolaboracija *Virgo* u okolini Pize (Italija) nezavisno je počela da konstruiše svoj detektor gravitacionih talasa, a sada je udružena sa Amerikancima. Japanski veliki podzemni detektor *KAGRA* radi na veoma niskim temperaturama, da bi se smanjio šum koji proizvode visoke temperature. Evropa i Australija planiraju da svoje radio-teleskope umreže kroz projekat praćenja pulsara. Nemci imaju nešto slabiji detektor *GEO 600*. To su trenutne grupe naučnika koji razvijaju gravitacionu tehnologiju i prave aparature za detekciju gravitacionih talasa.



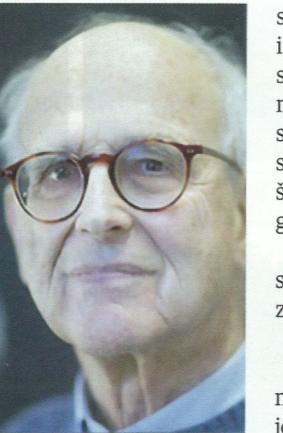
su tri satelita koja bi se vrtela oko Sunca, razmenjivala laserske zrake i na taj način merili relativno rastojanje među sobom, a oscilacije rastojanja bi slale informaciju o gravitacionom talasu. Takav detektor bi merio gravitacione talase na nižim frekvencijama od sadašnjih koje možemo da „čujemo“. Po prirodi stvari, on bi mogao da otkrije gravitacioni talas sa nekim drugaćijim izvorima od pomenutih, od nekih drugih pojava. Na primer, od eksplozija supernova, koje takođe izazivaju gravitacione talase - ali na drugačijoj skali; od tzv. kvazara (jezgra galaksije) ili supermasivnih crnih rupa. Prepostavlja se da u svakoj galaksiji postoji jedna supermasivna crna rupa, koja je mnogo veća od običnih. Može da ima masu hiljadu sunaca. Jedna supermasivna crna rupa nalazi se i u centru naše galaksije.

-Supermasivne crne rupe izazivaju sijaset različitih pojava, a jedan od rezultata svih tih pojava je da jezgro galaksije sija velikim intenzitetom. Kada su ti izuzetno svetli objekti otkriveni, posmatrači nisu znali kakvi su





Bertrand Barish, Kip Thorne i Rajner Vajs, dobitnici Nobelove nagrade za fiziku 2017.



FIZIKA EKSTREMNIH POJAVA

U vreme kada je detektovan prvi gravitacioni talas, on je bio rekorder u količini energije koja je emitovana u jedinici vremena. Snaga zračenja gravitacionog talasa je bila veća od ikada izmerene snage za bilo šta drugo. Nije postojao nijedan drugi proces u poznatom univerzumu koji je generisao tako veliku snagu zračenja. To je bilo nešto reda veličina milion eksplozija supernovih! I zbog toga je to moglo da bude otkriveno. To je vrlo intenzivno. Ali pošto je neverovatno daleko, ono stigne do nas tek kao teško prepoznatljiv signal. Taj rekord je probijen 2017., detektovan od drugih crnih rupa.

Dosad je detektovano 15-ak signala. Sada postoji novi rekorder čija je snaga zračenja još veća od prvog. Došao je od crnih rupa koje su teže od prethodnih. "To je fizika ekstremnih i najekstremnijih pojava u prirodi. Ne mogu da zamislim ništa ekstremnije. Smatra se da je eksplozija supernove ekstreman događaj, ali to nije ni primači snazi zračenja crnih rupa", smatra naš teoretičar kvantne gravitacije.

ona sila zvezde jaka, to u njenoj unutrašnjosti stvara veliki pritisak, visoku temperaturu i izaziva termonuklearne reakcije, tzv. termonuklearnu fuziju, koja oslobođa ogromnu količinu energije i opire se gravitacionom sažimanju zvezde. Zvezda je u tom slučaju u svom ravnotežnom režimu, i to je normalan, stabilan život zvezde.

Šta se, međutim, događa kada se nuklearno gorivo jednom potroši i više nema sile koja se opire gravitacionom sažimanju? Tri su tipične situacije u tom slučaju:

1) Ako zvezda ima malu masu, od nje se stvori nešto što se zove *beli patuljak* (što čeka i naše Sunce), krušto telo koje se na kraju ohladi i postane crni patuljak. 2) Ako je zvezda veće mase, od nje nastaje *supernova*. Usled nuklearnih reakcija, zvezda u nekom trenutku eksplodira i pretvara se u neutronsku zvezdu. Neutronска zvezda je gomila neutrona nabijenih na jednom mestu, slikevit: jedno neverovatno veliko atomsko jezgro. Neutronске zvezde su u poređenju sa zvezdama vrlo male, nekoliko kilometara u prečniku, a usled velike gustine neutrona mnogo puta teže od običnih zvezda.

3) Moguće je da zvezda ima još veću masu i kada se prekorači Čandrasekarova granica (Chandrasekhar, američko-indijski fizičar) ni neutronska zvezda ne može da podnese pritisak gravitacionog polja. U slučaju belog patuljka i neutronске zvezde, postoje na kraju ipak neke sile koje kontinuirano odbijaju gravitaciono privlačenje i - zaustave ga. Međutim, ako ima dovoljno mase, ni te sile neće zaustaviti gravitaciono privlačenje i ono u tom slučaju ide „do kraja”, sabije svu masu zvezde u jednu geometrijsku tačku. To je vrlo ekstreman događaj u kome nastaje crna rupa.

-LIGO detektori su pokazali da gravitacione talase emituju dve crne rupe koje se vrte jedna oko druge. Karakteristično je to da se one vrte. U signalu koji je prvi put bio izmeren, *GW150914*, može da se vidi da njegov izvor predstavlja dve crne rupe, koje se vrte jedna oko druge brzinom polovine brzine svetlosti, a svaka od tih crnih rupa ima masu tridesetak masa Sunca (teža 36, lakša 29). Trideset puta su teže od našeg sunca. One su se obrtale na rastojanju od nekoliko stotina kilometara i frekvenciji opseg 20 do 200 herca, dve stotine krugova svake sekunde. Ne umem da predstavim koliko je to radikalni fizički sistem, nešto što je tako nabijene mase i tako teško a vrti se tako brzo.

Pošto se vrte velikom brzinom, crne rupe emituju veliku količinu gravitacionih talasa, pri čemu gube energiju i najzad doživljavaju kolaps. U trenutku kada

se spoje, formiraju novu veliku crnu rupu koja miruje i prestaje da emituje gravitacione talase. Taj signal koji se vidi na LIGO detektorima je poslednji stadijum padaanja crnih rupa, koje se prvo vrte sporo i daleko a zatim se približavaju jedna drugoj i vrte sve brže. Taj poslednji stadijum rotacije, *ringdown* (odzvonjavanje), pre nego što se spoje, nekoliko desetina sekunde, emituje najviše gravitacionih talasa i zbog toga možemo da ih vidimo.

Zašto pričam sve ovo? Zato što je jedna od najfantašističnijih pojava uopšte, bar za mene - gravitaciono pozadinsko zračenje.

O kavom je fenomenu reč?

Postoje tri vrste pozadinskog zračenja. Elektromagnetno ili mikrotalasno pozadinsko zračenje danas je vrlo popularna tema u naučnoj literaturi. O tome se priča i u medijima. Čak su i dve Nobelove nagrade dodeljene u toj oblasti, za to otkriće. Mikrotalasno pozadinsko zračenje je vizuelni elektromagnetički ostatak (svetlost, oblešak) Velikog praska. U trenutku kada je naš univerzum formiran, sve je bilo vredno usijana kafa i u toj ranoj fazi svog života nije bio providan. Kako se širio, razredio i hladio, postao je dovoljno hladan i dovoljno razređen da je mogao biti providan. Postojeća svetlost je od tog trenutka počela neometano da putuje kroz prostor i tu svetlost možemo danas da vidimo. To se zove mikrotalasno pozadinsko zračenje. Mi bukvalno vidimo svetlost koja je posledica Velikog praska, koja je nastala nekih 380.000 godina posle tog inicijalnog događaja. To je najstarija svetlost u poznatom univerzumu, prva svetlost. Svi izvori svetlosti koje možemo da vidimo i za koje znamo su nastali kasnije.

Druga vrsta pozadinskog zračenja dolazi od neutrina, čestica sličnih fotonima (svetlosti), ali malo drugačijih i mnogo neuvhvatljivijih. Kao što je univerzum postao providan za fotone, tako je postao providan i za neutrine - i to samo nekoliko sekundi posle Velikog praska, to je dakle još raniji signal. Ako bismo mogli da ga izmerimo, on bi nam dao sliku univerzuma pre nego što je postao providan za svetlost, pre mikrotalasnog pozadinskog zračenja.

„Voleo bih to da vidim“

- Za gravitacione talase univerzum je postao providan još ranije, uslovno rečeno, neposredno posle Velikog praska, deset na minus 44-ti stepen (broj koji se razlikuje od nule tek na 44-toj decimali) dela sekunde. To nije istovremeno kada i Veliki prasak, ali u izuzetno kratkom protoku vremena nakon tog događaja. Te gravitacione talase, teorijski govoreći, mogli bismo da vidimo. To je najstariji signal, najstarija informacija o našem univerzumu uopšte, koju bi teorijski mogli da otkriju detektorom veličine galaksija, nešto što može da se meri gledanjem u pulsare. I to je nešto što bih ja voleo da vidim za svog života, ako naučnici uspeju da naprave takav detektor. Bio bi to skup podataka o našem univerzumu od kojeg nema ničeg starijeg, najdublji eksperimentalni uvid u kosmologiju o stvaranju univerzuma koji možemo imati. Ne mogu da zamislim ništa konceptualno značajnije od toga, sve drugo je sekundarno. To je izuzetno teško registrovati, ali je moguće.

Šta bismo saznali merenjem gravitacionog pozadinskog zračenja? Osim što je samo po sebi izuzetno interesantno i značajno jer nam govoriti kako je Univerzum izgledao na samom početku svog postojanja, ovo zračenje bi sadržalo pregršt informacija o tome

kako se gravitacija ponaša na izuzetno malim rastojanjima, u režimu u kome dominiraju kvantne pojave. Drugim rečima, saznali bismo nešto novo o tzv. teoriji kvantne gravitacije, koja predstavlja osnovni nerešen problem moderne teorijske fizike.

- Ukoliko bismo uspeli da je konstruišemo, smatra Marko Vojinović, teorija kvantne gravitacije bi predstavljala krunu ljudskog poznavanja i razumevanja prirode uopšte. Ta teorija bi nam pružila jedinstvenu sliku i celovit opis svih prirodnih pojava u fizici. Kao što je Njutn izazvao prvu revoluciju u fizici ujedinjavanjem zemaljske i nebeske mehanike u jednu jedinstvenu teoriju, iako što je Ajnštajn izazvao drugu revoluciju ujedinjavanjem fizike i geometrije kroz svoju opštu teoriju relativnosti, na sličan način bi teorija kvantne gravitacije dovela do ujedinjavanja pojma geometrije (gravitacija) sa pojmom *informacije*

TREĆA REVOLUCIJA UFIZICI BI IZ KORENA PROMENILA NAŠE SHVATANJE PRIRODE PROSTORA, VREMENA, MATERIJE ICELOKUPNOG POSTOJANJA UNIVERZUMA U KOME ŽIVIMO

(kvantna teorija), izazivajući time treću veliku revoluciju u fizici. Ta treća revolucija bi iz korena promenila naše shvatnje prirode prostora, vremena, materije i celokupnog postojanja Univerzuma u kome živimo i čiji smo deo. I naglašava:

- Kvantna gravitacija bi predstavljala najveće dostignuće ljudskog uma u razumevanju prirodnih pojava, a gravitaciono pozadinsko zračenje predstavlja najveći izvor informacija o toj teoriji koje bismo ikada bili u mogućnosti da prikupimo.

Otkriće gravitacionih talasa je bilo očekivano, ali ta činjenica ne umanjuje njegovo epohalno značenje. Ima još stvari za koje ne znamo, ali i onih za koje postoje eksperimentalne indikacije da postoje, mada se o njima zna veoma malo. Tipičan primer je tamna materija, o kojoj bezmalo znamo samo da postoji i koliko je imao. A ne znamo ništa o njenim svojstvima jer ona ne interaguje sa materijom koja nas okružuje i od koje je sve sazданo u prirodi. Ne vidimo nikakve efekte tamne materije osim gravitacionih, koje je opet same po sebi teško meriti. Pošto ne znamo od čega se tamna materija sastoji ni koje zakonitosti zadovoljava, i matematički model eventualne teorije je teško formulisati. Tamne materije, paradoksalno, ima neuporedivo više nego obične, čak 80-85%. Ispostavlja se da sva fizika koju znamo u poslednjih stotinu godina opisuje samo 15-20 odsto onoga što postoji u prirodi.

Otkriće gravitacionih talasa je posebno značajno, kaže, jer su naučnici mogli precizno da odrede poreklo talasa, odnosno postojanje crnih rupa. Već je našlo direktnu primenu u astronomiji, *multi-messenger* astronomija je još jedan način da detektujemo pojave u i van naše galaksije. Za običnog čoveka oni zasad nemaju nikakvu praktičnu svrhu, ne može ih koristiti kao što koristi elektromagnetne talase. To ne znači da u budućnosti neće imati i praktičnu primenu, pogotovo u kontekstu neverovatno brzog razvoja tehnologije.

- Uzimam često primer jednog Ajnštajnovog rada iz teorijske fizike, vrlo apstraktнog karaktera, o nekim eksperimentima atoma. Zanimljiv eksperiment koji to proučava. Kada se rad pojavio, nije ničemu služio. Sto godina kasnije, studirajući pojau koju je Ajnštajn opisao, analizirajući je i pokušavajući da je primene u laboratorijskim, naučnicima su napravili *laser*. Gotovo nema oblasti na našoj planeti u kojoj taj apstraktni Ajnštajnov rad nije našao primenu, trebalo je samo da protekne više decenija između zamisli i realizacije.

Fundamentalni fizičari radi na dugе staze. Ne mogu da znam da li će gravitacioni talasi imati primenu za našeg života, ali mogu da se kladim da će u nekom trenutku u budućnosti čovek od ovog otkrića profitirati. U kom obliku i kada, to ne može da se predviđi. *Global Positioning System (GPS)* ne bi radio bez razumevanja Opšte teorije relativnosti. I to je direktna primena. Oni se danas koriste i u najbanalnijim slučajevima, u najsvakodnevnjem životu.

Kao što je bila uzbudljiva evolucija naših saznavanja i saznanja o suštini prirode od Anaksimandra do ovih dana, u kojima gravitacioni teleskopi skidaju veo po veo s kosmičkim tajni, čini se da nas čeka još uzbudljivu budućnost. Sve više se uveravamo da stvarnost nije kao što izgleda, kao što tvrdi autor istoimenog dela, struktura prostora je diskretnija, na najsitnjim skalamama vreme nestaje, crne rupe eksplodiraju... Svemir tek treba da otkrijemo.  Miloslav Rajković

