

Br. 2 | Novembar 2020

FIZIS

ČASOPIS STUDENATA FIZIČKOG FAKULTETA, UNIVERZITETA U BEOGRADU

FORENZIČKA
UMETNOST

KAKO NAPRAVITI
SVEMIRSKU BOMBU

TENZIJA OKO HABLOVE
KONSTANTE

STRELA VREMENA

PROF. SAMIR SALIM
NA TRAGU
SUPERMASIVNE
CRNE RUPE

Drage kolegice i kolege,

Zadovoljstvo nam je da Vam predstavimo projekat ponovno pokrenutog časopisa studenata Fizičkog fakulteta pod nazivom "FIZIS". Časopis je osmišljen tako da sadrži zanimljive i aktuelne teme iz sveta fizike kako sa naučne strane, tako i sa svakodnevnog i karijernog aspekta. U "FIZISU" ćete u formi stalnih rubrika i nezavisnih kolumni moći da čitate intervju sa raznim profesorima i naučnicima širom sveta, o njihovom životu, studiranju i karijeri u fizici. Imaćete priliku da čitate o interesantnim, stručnim temama iz fizike i matematike koje su edukativnog karaktera i prevazilaze, pa čak i dopunjuju fakultetsko gradivo. Naći ćete neverovatne priče o primeni fizike u različitim civilizacijskim aspektima, čuti o fantastičnim temama iz vrlo naprednih i aktuelnih oblasti istraživanja ali ispričanih tako da ih svi mogu razumeti. Imaćete uvid u najnovija istraživanja i njihove rezultate ali i u karijerne mogućnosti i savete za dalji razvoj karijere kao fizičara.

Redakciju časopisa trenutno čine: doc. dr Duško Latas, naučna saradnica dr Aleksandra Dimić, naučni saradnik dr Dragoljub Gočanin, Irina Ručnov, Katarina Prokić, Luka Jevtović, Zlatan Vasović, Jovan Mitić.

POZIVAMO SVE ZAINTERESOVANE KOLEGINICE I KOLEGE DA SE PRIDRUŽE UREDNIŠTVU i pomognu nam da doprinesemo našoj maloj zajednici na jedan kvalitetan i lep način. Ukoliko želite da se prijavite ili imate komentare na tekstove, primedbe i predloge, pišite nam na adresu casopisfizis@ff.bg.ac.rs i uživajte u našem novom-starom časopisu "FIZIS".

SADRŽAJ

F I Z I S - B R . 2

- 4 Vesti iz fizike
- 6 Intervju sa naučnikom
 Na tragu supermasivne crne rupe
- 10 Naučni kutak
 Tenzija oko Hablove konstante
- 17 Potprostor radoznalosti
 Kako napraviti svemirsku bombu u sopstvenom
 galaktičkom dvorištu
- 20 Fizika u neke druge svrhe
 Šta je forenzička umetnost?
- 23 Eksplozija misli
 Edington i strela vremena

VESTI IZ FIZIKE

Novi rekord u merenju vremena: zeptosekunde

16. oktobar 2020.

Fizičari sa Geteovog univerziteta u Frankfurtu zajedno sa svojim kolegama iz Hamburga i Berlina izmerili su vremenski period izražen u zeptosekundama (10^{-21} sekundi). Merili su vreme potrebno fotonu da prođe kroz molekul vodonika duž veze molekula i kao rezultat dobili 247 zeptosekundi, što je do sada najmanje izmereno vreme.

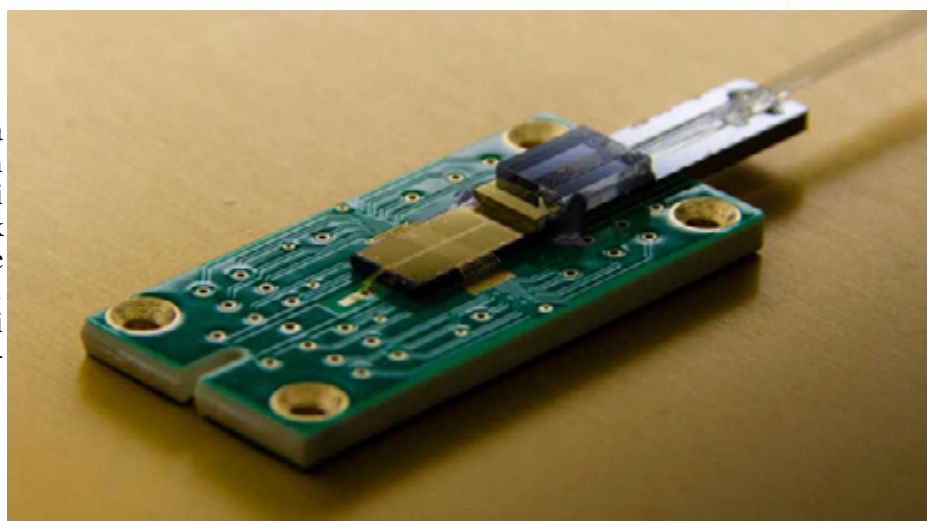
Izvor: Goethe-Universität Frankfurt

Optičko povezivanje za velike kvantne računare

21. oktobar 2020.

Na ETH u Cirihi pokazana je nova tehnika za izvršavanje osetljivih kvantnih operacija na atomima. U njoj se laserski zrak dostavlja unutar čipa, što je napredak u odnosu na dosadašnje dostavljanje putem spoljašnjih optičkih vlakana. Očekuje se da će ova tehnika omogućiti izradu velikih kvantnih računara zasnovanih na zarobljenim atomima.

Izvor: ETH Zurich



© K. Metha / ETH Zurich

Otkrivena voda na osvetljenoj strani Meseca

26. oktobar 2020.

NASA je prvi put potvrdila postojanje vode na osvetljenoj strani Meseca, pomoću specijalizovane opservatorije *ŠOFIA*. Otkriće u krateru Klavije, jednom od najvećih na Mesecu, ukazuje na to da prisustvo vode na Mesecu nije ograničeno na hladna zasenjena mesta oko polova.

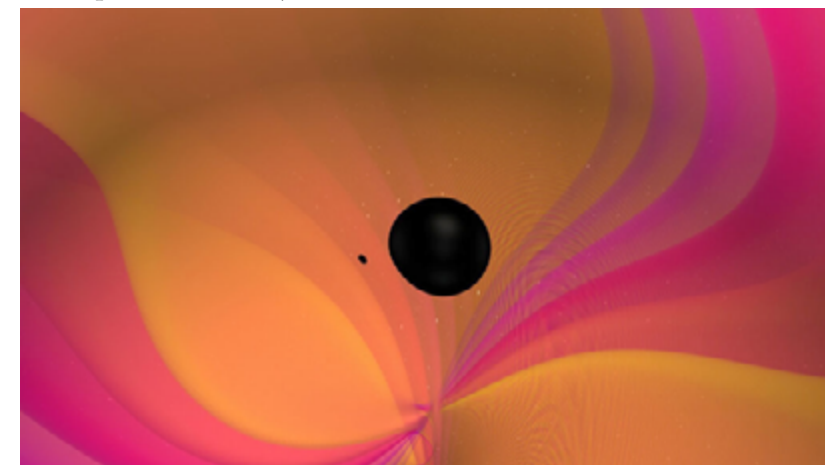
Izvor: NASA

Do sad pedeset detekcija gravitacionih talasa

28. oktobar 2020.

Od aprila do oktobra 2020. gravitacioni talasi su detektovani 39 puta, što je skoro četiri puta više od prethodno detektovanih 11 puta od 2015. kada su počeli s radom detektori *LIGO* u SAD-u i *Virgo* u Italiji. Većina događaja koji su izazvali gravitacione talase bili su sudari crnih rupa, ali među njima ima i sudara neutronske zvezde.

Izvor: ScienceNews



© N. Fischer, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno/Max Planck Institute for Gravitational Physics

Novi kandidat za kvantnu spinsku tečnost

6. novembar 2020.

Istraživači Univerziteta u Anžeu osmislili su i napravili materijal *EDT-BCO* koji zadovoljava osobine kvantne spinske tečnosti (engl. *Quantum spin liquid*), neobičnog stanja materije koje karakteriše dalekosežna kvantna uvezanost i odsustvo magnetne uređenosti. Ovaj materijal može imati primenu u izradi kvantnih računara i superprovodnika.

Izvor: ScienceDaily

Uspešno poništeno magnetno polje

29. novembar 2020.

Tim naučnika, uključujući i dva fizičara sa Univerziteta u Saseksu, pronašao je praktičan način da zaobiđu ograničenja oblika magnetnog polja nametnuta Irnšouovom teoremom (engl. *Earnshaw's theorem*), i poništi dejstvo drugog polja. Ovo je prethodno postignuto na visokim frekvencijama, ali sada je rezultat dobijen i na niskim frekvencijama što odgovara uslovima u biološkim sistemima.

Izvor: University of Sussex

Autor: Zlatan Vasović, student FF

Na pragu supermasivne crne rupe

Intervju sa profesorom
Samirom Salimom

Nobelovu nagradu za fiziku 2020. godine podelilo je troje naučnika. Prva polovina nagrade dodeljena je profesoru Rodžeru Penrouzu za matematičke metode koje su doprinele razvoju Opšte teorije relativnosti i opis nastanka crnih rupa, dok je druga polovina podeljena na dva jednaka dela među Rajnhardom Gencelom i Andreom Gez koji su otkrili supermasivnu crnu rupu u centru naše galaksije. O tome kako je raditi u „timu za Nobela“, o svojim đačkim i studentskim danima i ljubavi prema astrofizici razgovaramo sa bliskim saradnikom Andree Gez, Samirom Salimom, profesorom na Departmanu za Astronomiju Univerziteta Indijana u Blumingtonu, SAD.

1. Za sve koji nisu imali prilike da pročitaju rad Ghez, Andrea M., Salim, Samir, et al. "Measuring distance and properties of the Milky Way's central supermassive black hole with stellar orbits." The Astrophysical Journal 689.2 (2008): 1044., da li možete ukratko da objasnite ideju iza metoda koji je korišćen? Koliko dugo je trajalo uzimanje i obrada podataka kako bi se došlo do otkrića? Koliko ljudi je učestvovalo na projektu?

O gigantskoj crnoj rupi u centru naše galaksije, 25 hiljada svetlosnih godina od Sunčevog sistema, se decenijama spekulisalo, ali je bilo teško utvrditi da zaista postoji. Naime, prašina između nas i centra Mlečnog puta potpuno blokira vidljivu svetlost, dok je sfera dejstva crne rupe ograničena na „mikroskopski“ delić neba od jedne lučne sekunde. Sredinom devedesetih,

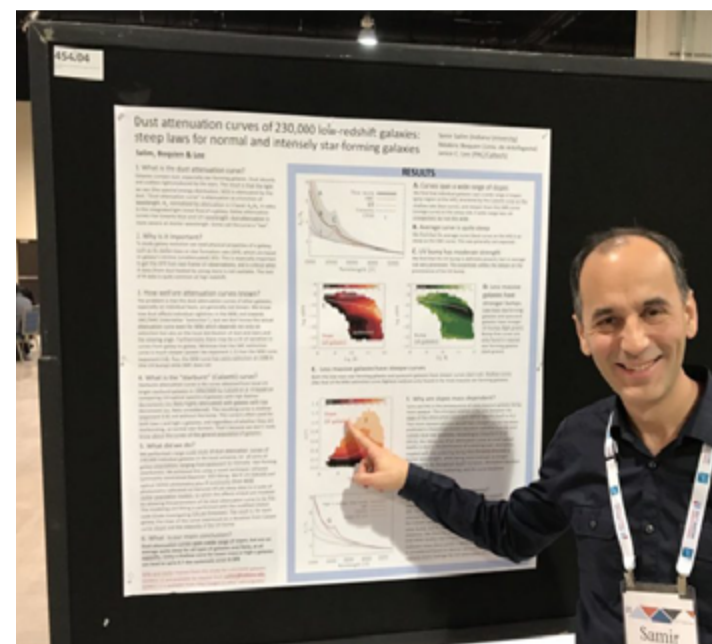
timovi Andree Gez u SAD i Rajnharda Gencela u Nemačkoj uspevaju da probiju zid prašine i izoštre pogled u sam centar koristeći detektore na infracrvenu svetlost i specijalne metode koje „stabilizuju“ atmosfersku turbulenciju, i opažaju da se iz godine u godinu neke zvezde vidno pomeraju, tj. kreću ogromnom fizičkom brzinom. Velike brzine su sugerisale postojanje centralne mase od ukupno više miliona Sunaca, ali ne i obavezno jedan kompaktan objekat.

Rad koji pominjete je jedan od ključnih i naveden je u obrazloženju Nobelovog komiteta. U vreme kada je objavljen, zvezde u centru galaksije su posmatrane već desetak godina, i videlo se da opisuju izdužene orbite, i što je važno za metod, počele su da se mere i radijalne brzine zvezda posmatranjem Doplerovog pomaka spektralnih linija. To je omogućilo da se precizno odrede orbite, i samim tim i precizna masa centralnog objekta. Takođe, kako su zvezde ponirale jako blizu centralne mase, to je isključilo mogućnost da je masa raspoređena

u klasteru manjih objekata. Moram da napomenem da se radi o izuzetno komplikovanom i teškom posmatračkom programu za koji se obrada podataka usavršavala godinama. Npr. jedan od velikih izazova je bilo utvrđivanje apsolutnog referentnog sistema, budući da nije bilo vangalaktičkog objekta u vidnom polju. Sa Andreom Gez je na ovom projektu tokom poslednjih 25 godina radilo nekoliko desetina ljudi, mada je većina njenih studenata i saradnika bila fokusirana na neke druge aspekte vezane za centar Mlečnog puta.

2. Naporan rad je urodio plodom i sigurno ste jako ponosni na rezultate. Da li nam možete ispričati kako je došlo do saradnje sa Andreom Gez i kako je izgledalo raditi u njenom timu? Da li imate neku anegdotu koju možete podeliti sa čitaocima Fizisa?

Kao postdiplomac na univerzitetu Ohajo Stejt sam 1999. sa mentorom Endrju Guldom napisao rad gde je bio predložen metod za simultano korišćenje više zvezda za preciznije određivanje mase i rastojanja do supermasivne crne rupe. Par godina kasnije sam došao na Kalifornijski univerzitet u Los Anđelesu (UCLA), ali kako bih radio u timu za NASA-in satelit za ultraljubičaste zrake (GALEX). Igrom slučaja, na UCLA radi prof. Gez, koja je u to vreme po prvi put prikupila dovoljno posmatranja da se metod orbita primeni, pa smo se ubrzo po mom dolasku, tokom neformalnog časkanja koje studenti organizuju svakog petka, dogovorili da se u vreme kada nisam zauzet svojim projektima pozabavim i tim proračunima. U narednim godinama smo blisko sarađivali, neki put intenzivnije, neki put manje, zavisno i od



Profesor Samir Salim

raspoloživog vremena. U sećanju su mi ostale prijatne i interesantne naučne diskusije sa prof. Gez. Jednom prilikom, nakon nekoliko iscrpljujućih noći posmatranja na teleskopu Kek na Havajima, jedino na šta sam mogao da mislim je bio odlazak na počinak. Međutim, prof. Gez je bila previše uzbuđena novim posmatranjima i počela je, u četiri ujutru, da piše rad. Njen entuzijazam za projekat, neverovatan trud i požrtvovanje su bili izuzetno inspirišući za sve koji su imali kontakt sa njom.

3. Trenutno se bavite morfologijom galaksija i vezom morfoloških parametara galaksija i zvezdane evolucije unutar njih. Koje metode se najčešće koriste kako bi se napravila tražena veza? Šta je finalni cilj istraživanja?

Rad na projektu prof. Gez je bio jako zanimljivo iskustvo, međutim i tada i sada se prvenstveno bavim izučavanjem otvorenih pitanja vezanih za nastanak i razvoj galaksija. Danas opažamo dva glavna tipa galaksija: spiralne i eliptične. Dok prve, poput Mlečnog puta i dalje aktivno formiraju nove zvezde, eliptične galaksije su mrtve i ne zna se od kada i zašto su takve. Doprinos ovom pitanju sam dao 2010. kada smo pomoću snimaka sa satelita GALEX i Hablovog svemirskog teleskopa ustanovili postojanje prelaznog oblika između ova dva tipa- morfološki stare galaksije sa izvesnim procentom mladih zvezda. Ovaj novi tip galaksija je sada u fokusu mnogih istraživačkih timova zato što se nadamo da mogu da osvetle pitanje zbog čega neke galaksije gube gas i umiru. Jedna od vodećih hipoteza je da su u taj proces umešane upravo supermasivne crne rupe. Kao metod za istraživanja koristim velike statističke uzorke i modeliranje svetlosti galaksija emitovane u raznim delovima EM spektra, od iks zraka do radio talasa.

4. Tokom 2019. godine pojavio se kolaborativni rad Doctor, Zohery, et al. "A search for optical emission from binary black hole merger GW170814 with the Dark Energy Camera." The Astrophysical Journal Letters " 73.2 (2019): L24. gde ste i vi jedan od autora. Svi smo upoznati sa GW170814, četvrtom detekcijom gravitacionih talasa koji je došao usled spajanja dvojnog sistema crnih rupa, ali prvim koji je detektovan od strane i LIGO i Virgo detektora. Na koji način je sprovedena „potraga“ za optičkom emisijom iz tog događaja i da li možete ukratko objasniti šta je i na kom principu radi kamera za tamnu energiju?

Radi se o interesantnoj sinergiji dva aktuelna projekta. Veliki cilj kosmologije danas je da se nađe jednačina stanja tamne energije. To se u projektu Dark Energy Survey, koji koristi pomenutu kameru, radi tako što se statistički utvrđuju distorzije oblika velikog broja galaksija zbog gravitacionog skretanja svetlosti ('weak lensing'), iz kojeg se dobija gustina materije u raznim periodima širenja svemira, i time kosmološki parametri vezani za tamnu energiju. Za to merenje su potrebni snimci velikog broja galaksija, koji ova kamera, sa velikim vidnim poljem od dva stepena, omogućuje. Iz istog razloga je ta kamera optimalna da za kratko vreme snimanja pokrije deo neba iz koga su nam došli gravitacioni talasi, a čija je lokalizacija samo na osnovu LIGO i Virgo triangulacije relativno neprecizna. Optičku emisiju, kao što se i očekivalo u slučaju spajanja dve crne rupe, nismo našli, ali bilo je vredno proveriti to.

5. Pre nego što ste se otisnuli na naučni put, bili ste đak Matematičke gimnazije, polaznik i saradnik Istraživačke stanice Petnica, student Matematičkog fakulteta. Da li postoji neki događaj iz đачkih ili studentskih dana koji vas je posebno privoleo astrofizici?

Rad na projektu
prof. Gez je bio
jako zanimljivo
iskustvo

Veliki cilj
kosmologije
danas je da se
nađe jednačina
stanja tamne
energije

Matematička gimnazija, Petnica i studije na Matematičkom i Fizičkom fakultetu su deo istog puta koji sam sledio od ranog detinjstva. Kao đak prvak osnovne škole Janko Veselinović u Beogradu sam imao tu sreću da se združim sa Predragom Radulovićem, takođe zanesenjakom za astronomiju. To naše dečije „otkrivanje“ tajni svemira i prijateljstvo koje je iz toga proisteklo je u meni osnažilo odlučnost da se posvetim tom cilju. U studentskim danima veliki podstrek mi je dala profesorka Jelena Milogradov Turin (1935-2011). Uprkos teškoj situaciji u zemlji tokom mog studiranja, hiperinflaciji, sankcijama i ledenim učionicama, zahvaljujući predanosti nastavnog osoblja stekao sam potrebno znanje. Na studijama sam stekao i dobre prijatelje, poput Dejana Uroševića, sada profesora i prodekana na Matematičkom fakultetu.

6. Ova godina ostaće upamćena kao godina digitalne komunikacije, konferencija i nastave koji se odvijaju na daljinu. Da li imate preporuku za predavanja ili elektronsku knjigu za entuzijaste u oblasti astrofizike?

Studentima fizike i astrofizike bih posebno preporučio arhive video snimaka sa predavanja i simpozijuma koje organizuje Institut za svemirski teleskop u Baltimoru (Space Telescope Science Institute, <https://www.stsci.edu/events/webcasts>) kao i snimke plenarnih predavanja sa konferencija Američkog astronomskog društva (American Astronomical Society Meetings, <https://aas.org/meeting-videos>). Što se pisanog sadržaja tiče, skoro da nema teme koja nije pokrivena u preglednim radovima koje objavljuje Annual Review of Astronomy and Astrophysics (<https://www.annualreviews.org/journal/astro>), gde sam nedavno objavio rad na temu prašine u galaksijama. Besplatne verzije praktično svih radova iz ovog izuzetnog zbornika je moguće skinuti sa arxiv.org.

Hvala puno na razgovoru!

Hvala i vama. Svim kolegama na Fizičkom fakultetu želim uspeh u radu i studiranju, kao i srećnu 2021.

Autor: Aleksandra Dimić, naučna saradnica FF

Tenzija oko

Hablove konstante

Većini studenata, ili uopšteno ljudi koji su imali direktnog kontakta sa fizikom i fizičkim eksperimentima, bolno je jasna važnost i proces analize grešaka u merenjima. Ukoliko neki nesrećni student izmeri gravitaciono ubrzanje Zemlje kao $g = (10.13 \pm 0.06) \text{ m/s}^2$, mora biti sposoban da argumentuje nedostatke opreme i procedure merenja koja je dovela do toga da se dobijena vrednost ni u okvirima greške ne poklapa sa realnom.

Međutim, taj nesrećni student, koliko god bio nesrećan što mu je laboratorijska vežba neuspela, je zapravo vrlo srećan u pogledu toga što ima neko zvanično rešenje, naime ekstremno precizno i pouzdano izmerenu vrednost gravitacionog ubrzanja, na koje može da se osloni. Ovo mu omogućava da u trenutku kada dobije navedeni rezultat, automatski zna da je nedostatak bio u proceduri merenja i izvršenju eksperimenta, a ne u njegovom shvatanju fizike i, konkretnije, gravitacije. Ovo nije uvek slučaj, i analogna neslaganja retko se mogu zasigurno pripisati nedostacima u eksperimentalnom postupku, što zatim ima vrlo zanimljive implikacije za razvoj fizike, kao što ćemo videti.

Alisa i Bob, po stoti put

Zamislimo na trenutak jednu specifičnu situaciju. Uzmimo dotičnog nesrećnog studenta 1 i pridružimo mu kolegicu iz laboratorije, nesrećnu studentkinju 2. Nazvaćemo ih Bob i Alisa zbog toga što je kreativnost oko imena u misaonim eksperimentima precenjena. Bob i Alisa žive u paralelnom univerzumu u kome gravitaciono ubrzanje Zemlje nikad nije bilo izmereno. Bob, kao što smo već naveli, vrši svoj eksperiment i dobija vrednost $g = (10.13 \pm 0.06) \text{ m/s}^2$, koristeći metodu merenja g preko malih oscilacija matematičkog klatna. Da bi bio siguran u svoj eksperiment, ponovio ga je nekoliko desetina puta sa različitim kuglicama, koncima i stalcima za klatno.

Sa druge strane, Alisa u istoj laboratoriji meri isto gravitaciono ubrzanje, ali ga meri tako što ima elektronsku aparaturu u kojoj ona pritisne dugme, koje zatim otpusti lopticu i istovremeno pokrene digitalnu štopericu. Loptica pada, a na dnu aparature nalazi se laserski sistem koji će detektovati trenutak kada dotakne pod. U tom trenutku merenje štoperice se prekida, i Alisa koristi model slobodnog pada bez početne brzine kako bi odatle izračunala gravitaciono ubrzanje. Alisa, ponovivši eksperiment nekoliko puta, dobija vrednost za gravitaciono ubrzanje od $g = (8.7466 \pm 0.0003) \text{ m/s}^2$. Podsetiću čitaoca da vrednost od 9.81 izbacim kroz prozor, jer g ne znamo u ovom paralelnom univerzumu. Ono može biti bilo koja od ove dve vrednosti, a vidimo da su one fundamentalno različite i da se ni približno ne preklapaju u okviru svojih grešaka. Ovaj put, ne možemo se voditi logikom „Aha, znam da mi je $g=9.81 \text{ m/s}^2$, čim smo dobili nešto što se sa time ne poklapa u okviru greške, znači da je bilo nekih tehničkih nedostataka u aparaturi, nepreciznosti u merenjima, pogrešno izračunatih vrednosti, ili ne-

kih drugih grešaka u tome kako smo mi izveli eksperiment“. Nemamo mogućnost da se oslonimo na neko drugo merenje koje smatramo autoritetom.

Gravitaciono ubrzanje, ovde, može biti i 8.75, i 10.13. Ali znamo da ne može oba. Ali da li znamo? Šta ako gravitacija funkcioniše na neke mnogo kompleksnije načine od toga kako smo do sada pretpostavili? Šta ako oscilatorno kretanje klatna, za razliku od slobodnog pada, stvara nekakvu novu

Samo loša merenja ili nova revolucija u fizici?

i egzotičnu interakciju sa gravitacionim poljem, npr. zbog nekakve simetrije u kretanju, koje dovodi do toga da jače interaguje i generiše veće ubrzanje? Šta ako, sa druge strane, iz nekog razloga kog nismo bili svesni do sad pri slobodnom padanju sila otpora vazduha počne da se ponaša drugačije i više ne bude zanemarljiva kao što je bila kod matematičkog klatna? Šta ako, uprkos tome što smo bili ubeđeni da je u pitanju fizika za nivo osnovne škole, zapravo ne razumemo slobodni pad i ravnomerno ubrzano kretanje u potpunosti? Sva ova, i brojna druga pitanja postaju potpuno legitimni razlozi za ovakav razdor u merenjima, kada ne možemo da se oslonimo na unapred poznatu, „objektivnu“ istinu. Zamislimo da se ovo desilo u nekim vrlo ozbiljnim uslovima, gde su preduzete sve moderne mere da eksperimenti budu što precizniji. Dakle, nema merenja dužina lenjirom, nema pirkanja vetrića kroz otvorene prozore, raskopavanja Dušanove da izgleda kao prosečni rov iz Prvog svetskog rata... netačna merenja su vrlo malo verovatna opcija, gotovo pa nemoguća.

Dakle, ili ne razumemo fiziku koja stoji iza fenomena koji pokušavamo da merimo, ili ne razumemo fiziku modela koji pokušavamo da primenimo da bismo kvantifikovali taj fenomen (gravitaciono ubrzanje u ovom slučaju). Drugim rečima, problem je u tome što ne vidimo neku novu fiziku ili ne vidimo neku implicitnu predrasudu u merenju koje sprovodimo. Oba, a specijalno ovo prvo, su vrlo uzbudljive opcije za svakog fizičara. A upravo to se dešava sa Hablovom konstantom trenutno.

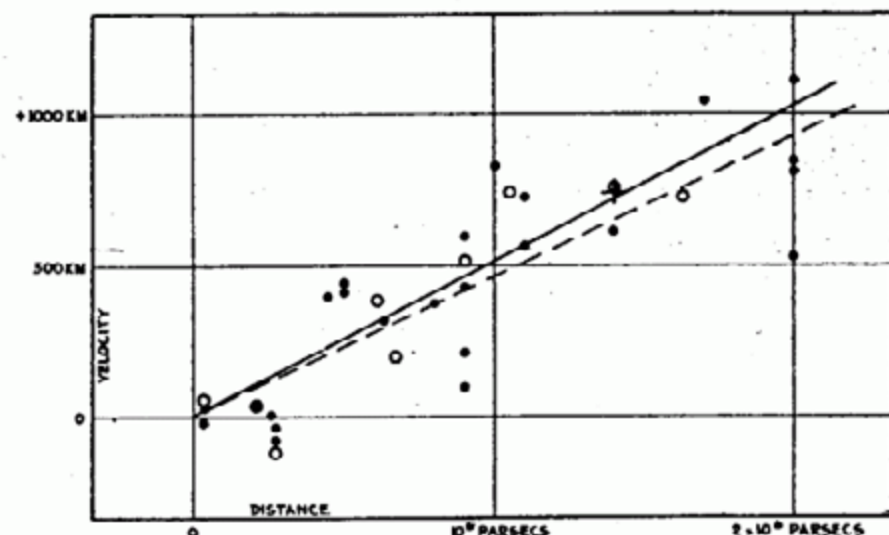
Kosmologija za neupućene

Za one kojima astrofizičke teme nisu bile preterano zanimljive do sad (???) prođimo na brzinu to šta je zapravo Hablova konstanta i na koja dva načina trenutno možemo da je merimo, kako bismo kasnije mogli da razumemo kakve pomenute implikacije ova tenzija može imati za modernu fiziku. Za one koji bi hteli objašnjenje sa manje mahanja rukama, mogu proći kroz poglavlje 27.2 u [1] i 9.3 u [2], ili bilo koji drugi udžbenik iz astrofizike na željenom nivou koji se bavi širenjem univerzuma. Kako bi ovaj članak održali što čitljivijim, zadržaćemo se na relativno fenomenološkom pristupu. Koga dodatno zanima pristup ovoj tematici u kontekstu modernih naučnih radova, može pogledati [3], [4] ili [5] (ovde se posebno stavlja akcenat na jednu od važnijih implikacija koju ćemo i mi pomenuti).

Posmatrajući svemir, konkretno udaljene galaksije i njihovo kretanje, postalo je jasno da se galaksije kreću sve brže od nas što su dalje od nas. Ovo otkriće, pripisano Edvinu Hablu, dovelo je kasnije do razvitka čitavog modela koji opisuje univerzum sačinjen od barionske materije, tamne materije, i tamne energije – koja je ujedno i uzrok ovakvog kretanja. Naime, tamna energija (bar iz onoga što smo do sad mogli da zaključimo, a to nije previše) najviše dolazi do značaja i postaje dominantna tamo gde drugih komponenti (barionske i tamne materije) ima malo – odnosno u međugalaktičkom prostoru. Tu ona deluje tako da, laički gledano, „stvara“ novi prazan prostor ni iz čega, odnosno širi prostor, analogno naduvavanju balona. Ovo dovodi do toga da će galaksije da se udaljavaju od nas, i to proporcionalno tome koliko ima praznog prostora između nas. Što više praznog prostora, to će se ubrzanije udaljavati, i vice versa.

Konstanta ove proporcionalnosti je upravo Hablova konstanta, koja nam daje odnos kolika će biti brzina (**km/s/Mpc**) u zavisnosti od toga koliko je galaksija daleko od nas (**km/s/Mpc**), što dovodi do fizičarima pomalo zbunjujuće jedinice km/s/Mpc.

Dakle, kako možemo izmeriti ovu vrednost? Verovatno prvi, i svakako tačan, instinkt bio bi da se izmere udaljenosti i brzine različitih galaksija i da se zatim fituje linearna zavisnost čiji bi koeficijent bio Hablova konstanta. Ovo je upravo ono što je i sam Hابل originalno uradio 1929. [6]



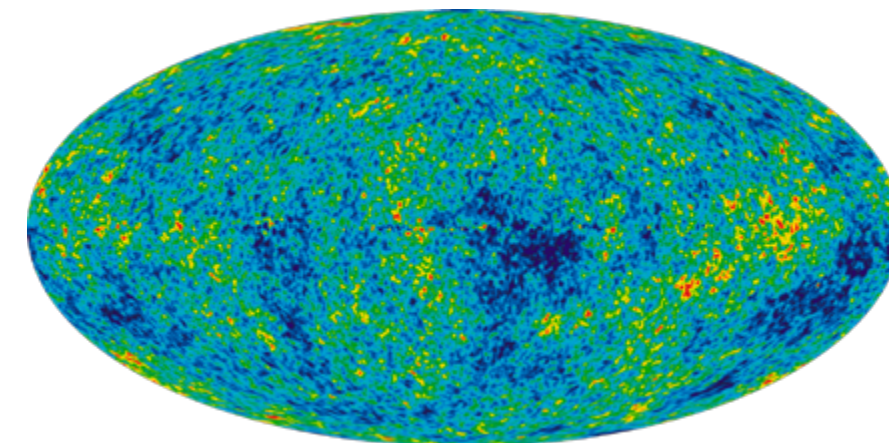
Slika 1 – Hابلov linearni fit iz kog je izračunao konstantu koja danas nosi njegovo ime

Iako je sam proces nalaženja Hablove konstante trivijalan, merenje tačaka nije. Radikalnu brzinu udaljavanja galaksija nalazimo iz Doplerovog pomaka određenih spektralnih linija u spektrima galaksija koje posmatramo, što zahteva ekstremno precizna merenja i vrlo napredne teleskope. S druge strane, za poziciju nailazimo na čuveni problem „da li je ovo nešto jako blizu što svetli jako slabo ili nešto jako daleko što svetli vrlo jako“. Na relativno malim udaljenostima možemo koristiti metodu paralakse, međutim, ovo prestaje da bude primenljivo kada pričamo o udaljenostima između galaksija. Stoga, pribegava se metodi standardnih sveća. Drugim rečima, tražimo objekte za koje ćemo znati njihovu luminoznost bez da je direktno merimo. Dobar primer su recimo supernove tipa Ia, za koje imamo poznat model eksplozije koja daje jasnu krivu sjaja tako da možemo samo na osnovu činjenice da znamo da je u pitanju supernova tipa Ia (i eventualno par relativno lako merljivih parametara, poput sastava i mase) da odredimo njenu luminoznost. Sada je dovoljno da, uporedivši izmereni sjaj objekta koji nas zanima i ovako neke supernove, na osnovu toga što nam je poznat njihov model odredimo i luminoznost tog objekta, pa samim tim i udaljenost do njega. Kao standardne sveće se, pored supernovih, koriste i cefeide, periodične zvezde čiju zavisnost masa-luminoznost-period znamo.

Koristeći ove metode za kalibraciju i određivanje udaljenosti i brzina raznih galaksija, uspešli smo da mapiramo tačke na plotu poput slike 1, samo sa mnogo više tačaka i mnogo manjim greškama. Na ovaj način izračunata je Hablova konstanta kao $H_0 = (73.24 \pm 1.74) \text{ km/s/Mpc}$.

Sa druge strane, postoji i drugi način da se ova konstanta izmeri, a to je kao jedan od parametara pri fitovanju krive za izmerene tačke spektra snage u ranom univerzumu. Pozadina ovog pristupa je malo kompleksnija – zainteresovani mogu naći dobar uvod u [7] (poslednja sekcija u 1.3), a

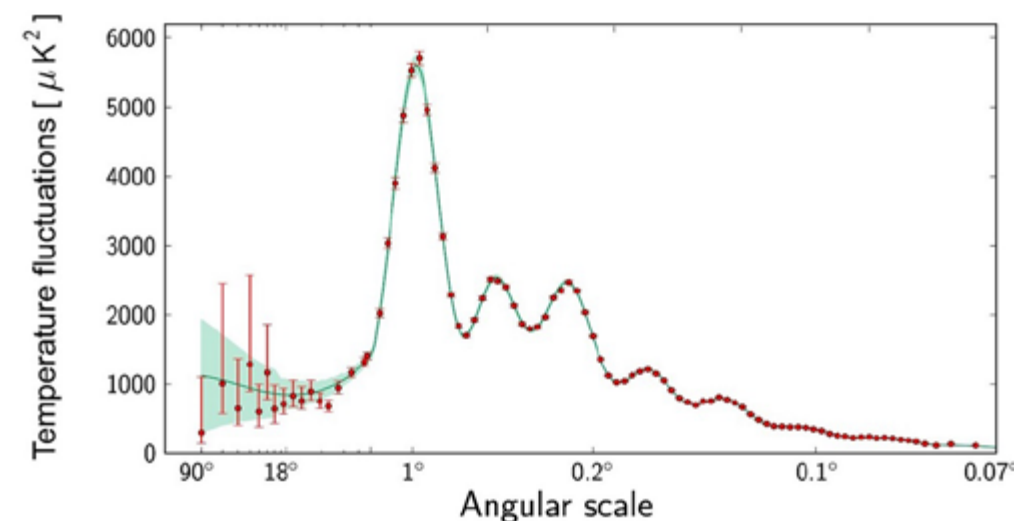
potrebne informacije za razumevanje osnova ovog metoda takođe u [7] (poglavljje 9.1), kao i u [8] (poglavljje 3.2, najpre 3.2.1 i 3.2.2). Naravno, ovde ćemo se pozabaviti ovom temom bez zalaženja u tu pozadinu. Naime, ceo metod bazira se na nehomogenostima prve svetlosti koja je propuštena i emitovana od nastanka univerzuma – takozvano kosmičko mikrotalasno pozadinsko zračenje (CMB). Intenzitet ove svetlosti je direktno korelisan sa gustinom materije u ranom univerzumu, u trenutku pre nego što je došlo do rekombinacije (momenta kada je svemir postao dovoljno hladan da fotoni mogu da počnu da se kreću slobodno). Posmatrajući mapu kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja (slika 2) jasno možemo uočiti pomenute nehomogenosti, za čiji izvor se uzima da su bile kvantne fluktuacije u ranom univerzumu.



Slika 2 – CMB

Nemojte dozvoliti da vas boje na slici zavaraju – razlika između najmanje i najveće vrednosti ovde je reda μK – što je i razlog zašto na najvećim skalama svemir izgleda homogen i izotropan, dok na sitnijim skalama jasno vidimo odvojene galaksije, zvezde i planete (zapravo, galaksije i ostale strukture jesu direktna posledica ovih nehomogenosti – zamislite da se slika 2 „naduvala“ na ogromne skale, svaka od usijanijih tačkica bi predstavljala galaksije i klastere galaksija dok bi svaki hladniji region predstavljao velike regione praznog prostora, tzv. „voids“).

No, šta nama ovaj CMB može reći? Pa, ovako direktno gledano kao na slici 2, ne mnogo, bar ne u kontekstu koji je nama relevantan. Međutim, ono što možemo uraditi jeste da analiziramo kakav je intenzitet ovih fluktuacija na različitim prostornim skalama. Drugim rečima, idemo redom i biramo različite prostorne skale (uglove pod kojima posmatramo delove neba), i na svakoj od njih zabeležimo koliko fluktuacija kog intenziteta smo našli. Ponovimo li ovo za „sve“ uglove od 90 do 0 stepeni, dobićemo nekakvu dekompoziciju ovih fluktuacija koju možemo predstaviti na grafiku – i ovu zavisnost zovemo spektar snage (power spectrum), i on izgleda nekako ovako:



Slika 3 – Spektar snage CMB-ja

Onima koji su imali kontakta sa Furijeovom dekompozicijom, ova priča verovatno zvuči vrlo poznato. U pitanju i jeste neki analogon Furijeovoj dekompoziciji, s tim što se ne radi sa uobičajenim talasima. Matematički gledano takođe postoje velike sličnosti. Vrlo moguće da vam je ovaj pik na malo više od jednog stepena privukao pažnju – u pitanju i jeste vrlo interesantno otkriće koje je vezano za nešto što se zove barionske akustične oscilacije (BAO) – no to je priča za neko drugo okupljanje.

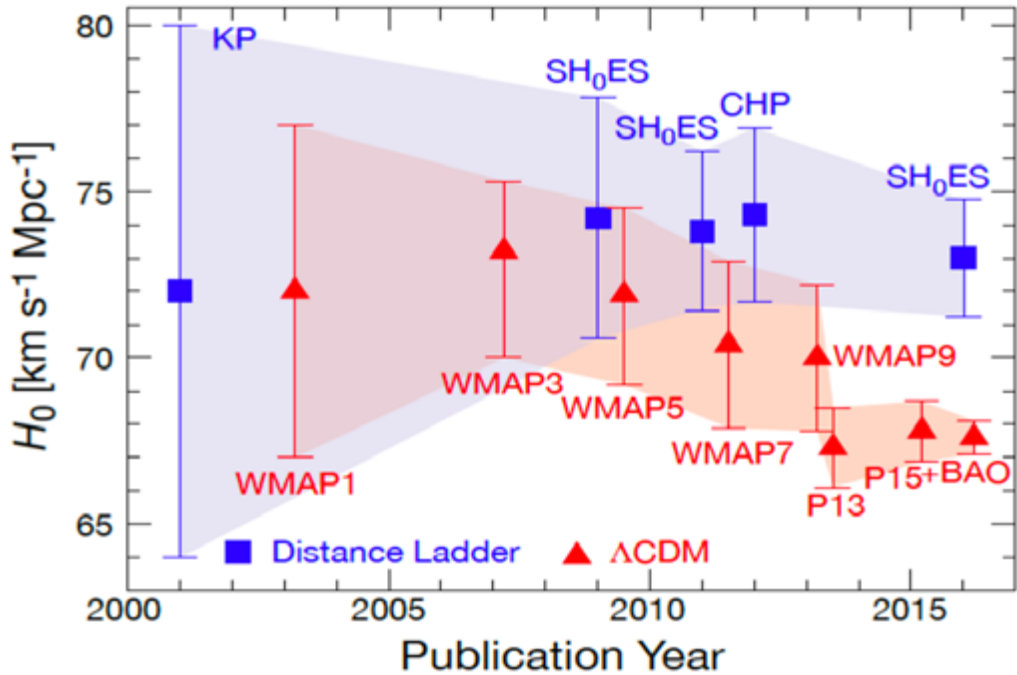
Dakle, sada imamo ove tačke koje smo prikupili iz vrlo preciznog mapiranja fluktuacija u CMB-ju, i, kao što vidimo na slici 3, imamo i zelenu liniju koja fituje te tačke. Kompleksan oblik krive odmah ukazuje da je u pitanju funkcija sa nekoliko parametara – konkretno šest. Jedan od njih je upravo i Hablova konstanta, što i ima fizičkog smisla jer očekujemo da će brzina širenja svemira uticati na to kako vidimo nehomogenosti u njemu. Ostalih pet parametara vezani su za konkretni model univerzuma koji pratimo – odnos zastupljenosti barionske i tamne materije i tamne energije, zakrivljenost univerzuma, trenutak kada je došlo do rekombinacije itd. Ovo znači da različita posmatranja i fizički zakoni u drugim oblastima kosmologije daju ograničenja na svaki od ovih parametara (kao trivijalan primer recimo zastupljenost barionske materije ne može biti nula jer, jelte, postojimo). Uz ova ograničenja oko svakog parametra, relativno sofisticiranim numeričkim metodama poput Monte Carlo Markov Chain (MCMC) ili χ^2 možemo fitovati zelenu krivu, i iz tog fita odrediti i Hablovu konstantu. Poslednja dobijena vrednost ovim metodom je $H_0 = (67.8 \pm 0.9) \text{ km/s/Mpc}$.

Hm.

CMB vs. cefeide: građanski rat

Problematika ovde postaje jasna. Imamo dva meranja sa potpuno različitim metodama koja se oslanjaju na potpuno odvojene oblasti fizike, i imamo dve Hablove konstante koje ne samo što se ne poklapaju unutar svojih grešaka, već je razlika između njih tolika da sada postaje i statistički značajna. Evoluciju panike astrofizičarske naučne zajednice sa vremenom možemo lako videti na slici 4 (preuzeto iz [9]):

Slika 4 – Merene vrednosti sa greškama za Hablovu konstantu. Plavom bojom su prikazane vrednosti dobijene Hablovom metodom iz izmerenih kretanja galaksija sa uključenim sve većim brojem galaksija i boljom kalibracijom, dok su crvenom prikazane vrednosti dobijene iz mapiranja CMB zračenja sa sve većim preciznostima



Na kraju ovog grafika, odnosno pre par godina, vidimo drastično neslaganje ovih merenja i to je i trenutak kada je ovaj problem u naučnoj zajednici dobio ime Hablova tenzija (Hubble tension), i postavljen je kao otvoren problem.

Situacija je, očigledno, ista kao i u našem misaonom eksperimentu sa Alisom i Bobom. Nemamo neko „objektivno tačno“ rešenje koje će nam reći da li i koje od ova dva merenja ne valja i zašto. Eksperimenti sa tehničke strane su odrađeni perfektno – u pitanju su višemilionski projekti na kojima je do sad radilo više stotina naučnika. Dakle, ostaju dve mogućnosti koje smo pomenuli i na početku. Ili ne vidimo neku novu fiziku, ili ne vidimo neku implicitnu naklonost u našim merenjima. Zašto bi jedno od ova dva merenja bilo naklonjeno ili iskrivljeno, pa davalo pogrešan rezultat? Ovo opet navodi na nekakvu novu fiziku i ukazuje na vrlo moguće pogrešno shvatanje naših trenutno prihvaćenih modela. Šta ako je naše razumevanje ranog univerzuma pogrešno? Postoji šest parametara koji figurišu u zelenoj krivoj sa slike 3, svaki od njih za sobom vuče svoju granu kosmologije – šta ako neka od njih ima neki nedostatak kog nismo bili svesni do sad? Šta ako gravitacija ima neka neočekivana svojstva u ranom svemiru? Šta ako je univerzum zapravo zakrivljeniji nego što su dosadašnja merenja pokazala? Šta ako, sa druge strane, naše shvatanje širenja univerzuma, i rezon koji je Hابل primenio pre skoro celog veka, iz nekog razloga ne valjaju? Šta ako se tamna energija ponaša potpuno drugačije nego što smo mislili? Možda ne razumemo fiziku cefeida i supernovih Ia, na kojima leži praktično svaka druga oblast moderne posmatračke astronomije?

Šta je na horizontu?

Sva ova pitanja, baš kao i ona koja smo postavili vezana za merenje gravitacionog ubrzanja, su potpuno legitimna i, štaviše, jednako verovatna kao i neka neočekivana greška sa tehničke strane merenja. Čitava naučna zajednica aktivno radi na tome da odgovori na njih, tako da je odgovor „ne znamo tačno šta je u pitanju“. U ovom trenutku, ne bi trebalo previše istrčavati sa zaključcima, i naučna zajednica je ostala maksimalno konzervativna po tom pitanju. Mogućnost neuračunate eksperimentalne greške nije, i verovatno i neće biti potpuno isključena. Ipak, jeste vrlo malo verovatna, dok, sa druge strane, naše shvatanje ranog univerzuma i konkretan model koji je korišćen pri fitovanju krive na slici 3 (tzv. Λ CDM), nailazi na probleme i u drugim oblastima, što povećava razlog za verovanjem u to da je koren problema naše loše shvatanje fizike koja stoji iza njega. Ovo nije prvi put da se nalazimo na potencijalnom obronku sledeće naučne revolucije. Ista situacija bila je i pri prvom merenju neočekivane precesije Merkura, što je dovelo do razvoja opšte teorije relativnosti i uopšteno moderne teorije gravitacije. Takođe, istu situaciju smo imali i kod tzv. „ultraljubičaste katastrofe“, koja je dovela do uvođenja kvantizovane interpretacije svetlosti i posledično dovela do razvoja kvantne fizike kao celine.

Da li je Hablova tenzija ovakav vid problema, ili je u pitanju obična greška u analizi merenja? Ako jeste, kakva revolucija u fizici će se desiti zbog njega? Koje nove oblasti će izniknuti? Možemo samo pomno da posmatramo. I eventualno se pridružimo akciji svojim naučnim doprinosima.

Reference

[1] - Carroll, B.W. and Ostlie, D.A., 2017. An introduction to modern astrophysics. Cambridge University Press.

[2] - Choudhuri, A.R., 2010. Astrophysics for physicists. Cambridge University Press.

[3] - Riess, A.G., Macri, L.M., Hoffmann, S.L., Scolnic, D., Casertano, S., Filippenko, A.V., Tucker, B.E., Reid, M.J., Jones, D.O., Silverman, J.M. and Chornock, R., 2016. A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant. The Astrophysical Journal, 826(1), p.56.

[4] - Soares-Santos, M., Palmese, A., Hartley, W., Annis, J., Garcia-Bellido, J., Lahav, O., Doctor, Z., Fishbach, M., Holz, D.E., Lin, H. and Pereira, M.E.S., 2019. First measurement of the Hubble constant from a dark standard siren using the Dark Energy Survey galaxies and the LIGO/Virgo binary–black-hole merger GW170814. The Astrophysical Journal Letters, 876(1), p.L7.

[5] - Riess, A.G., Casertano, S., Yuan, W., Macri, L.M. and Scolnic, D., 2019. Large Magellanic Cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM. The Astrophysical Journal, 876(1), p.85.

[6] - Hubble, E., 1929. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the national academy of sciences, 15(3), pp.168-173.

[7] - Binney, J. and Tremaine, S., 2011. Galactic dynamics. Princeton university press.

[8] - Bernardeau, F., Colombi, S., Gaztanaga, E. and Scoccimarro, R., 2002. Large-scale structure of the Universe and cosmological perturbation theory. Physics reports, 367(1-3), pp.1-248.

[9] - Freedman, W.L., 2017. Cosmology at at crossroads: Tension with the Hubble Constant. arXiv preprint arXiv:1706.02739.

Autor: Luka Jevtović, student FF

KAKO NAPRAVITI SVEMIRSKU BOMBU U SOPSTVENOM GALAKTIČKOM DVORIŠTU

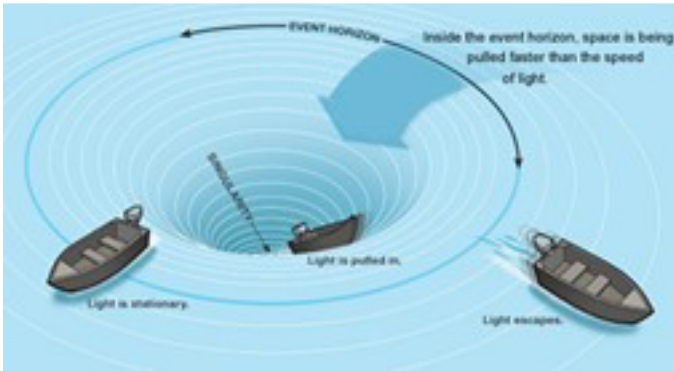
U ovom drugom delu trilogije o prostor-vremenu i crnim rupama, „Potprostor radoznalosti“ donosi odlične vesti za sve one kojima lagani, meditativni ton naracije i crne rupe nikako ne idu zajedno! Slažemo se u potpunosti da ovi sirovi entiteti sačinjeni od čiste destrukcije realnosti zaslužuju da budu sagledani iz potpuno drugačije perspektive nego kao nosioci nekakvih harmonija uz koje se moždano surfuje na talasima univerzuma. Zbog toga se dobro spremite jer sledi jedna totalno bombastična i eksplozivna priča!

Nakon što je Albert Ajnštajn 1915. godine predstavio svoju Opštu teoriju relativnosti, bilo je potrebno svega dva meseca da mladi fizičar Karl Švarcšild u potpunosti reši Ajnštajnovе jednačine za jednu relativno realističnu situaciju. Naime, analizirajući zakrivljenje prostor-vremena oko sferno simetrične mase (odatle realističnost), Švarcšild je našao metriku koja predviđa postojanje **horizonta događaja** ukoliko je masa dovoljno gusto zbijena. Da pojednostavimo: masa krivi prostor-vreme i to u zavisnosti od udaljenosti od mase (bliže masi je veće zakrivljenje). Ukoliko imamo dovoljno veliku masu upakovanu u dovoljno malu (sfernu) zapreminu, zakrivljenje prostor-vremena oko takvog objekta će biti toliko intenzivno da će na određenoj udaljenosti od centra tog objekta doći do kritičnog izobličenja prostor-vremena i prostor će početi da „teče“ brzinom svetlosti ka centru mase, a vreme će se zaustaviti za spoljnog posmatrača.

Sferna površina na kojoj se dešava to kritično izobličenje se naziva **horizont događaja** a njen poluprečnik **Švarcšildov radijus**. U tom smislu, horizont događaja je granica, a sve ispod njega se smatra crnom rupom.

Ova kritična zakrivljenost prostor-vremena na horizontu događaja implicira da je on takođe i najmanja udaljenost sa koje se može pobeći iz gravitacionog potencijala crne rupe ukoliko se objekat kreće najvećom dozvoljenom brzinom u univerzumu - brzinom svetlosti. Dakle, telu koje je malo ispod horizonta bi bila potrebna brzina veća od c da napusti crnu rupu, a to je nemoguće! To znači da apsolutno ništa, pa čak ni svetlost, ne može da napusti crnu rupu ukoliko pređe horizont događaja.

Ako ovo nije dovoljno čudno i apstraktno, podesimo se da masa krivi prostor-vreme a da je horizont



Slika 1 - Analogija crne rupe i prostor-vremena sa slivnikom i vodom

(napomena: u ovom slučaju voda ne rotira u vidu vrtloga)

događaja samo udaljenost na kojoj dolazi do kritičnog zakrivljenja. To ne znači da je horizont događaja mesto maksimalnog zakrivljenja - baš naprotiv! Ispod njega prostor-vreme nastavlja da se krivi još više ali je priroda tog zakrivljenja drugačija. Naime, na horizontu događaja je zakrivljenje takvo da prostor i vreme menjaju svoje uloge! Vreme preuzima prostornu ulogu i ono „ispunjava“ crnu rupu dok prostor „teče“ ka centru mase koji zovemo **singularitet**. Sama ova činjenica je dovoljna da čoveka drži budnim noćima tako da nećemo zalaziti u detalje ovog uvrnutog fenomena jer, iskreno, ni ozbiljni fizičari nisu baš sigurni kako to zapravo funkcioniše.

*Iako je ovo način na koji svi dokumentarni filmovi, naučno-popularni časopisi, pa čak i uvodni kursevi iz Opšte relativnosti opisuju crne rupe, činjenica je da nijedna realna crna rupa ne može biti dobro opisana Švarcšildovim rešenjem. Naime, realne crne rupe imaju jednu osobinu koja ih ključno razlikuje od Švarcšildovih. Štaviše, razlikuje ih toliko da im dozvoljava da budu potencijalni izvori energije za svemirske civilizacije, portali u druge univerzume, vremeplovi i - ono što nestrpljivo čekate - programirane galaktičke bombe! Dame i gospodo, predstavljamo vam **rotirajuće crne rupe**!*

S obzirom na to da crne rupe nastaju od zvezda sa dovoljno velikim masama koje za vreme svog života rotiraju, i na to da usisavaju okolnu materiju koja takođe rotira, zakon održanja momenta impulsa nam govori da će i crna rupa morati da rotira čuvajući svoj moment impulsa. Ovo je u skladu sa „No-hair“ teoremom koja kaže da crne rupe mogu imati samo masu, naelektrisanje i spin. Međutim, iako se znalo za važnost rotacije pri opisu crne rupe, bilo je neophodno skoro pola veka (uporediti sa Švarcšildova dva meseca) kako bi Ajnštajnovе jednačine bile rešene za rotirajući slučaj, a za to je zaslužan engleski fizičar Roj Ker po kome se ovakve crne rupe danas i zovu „**Kerove crne rupe**“.

Međutim, ovde treba napraviti digresiju i otkloniti potencijalnu zabludu. Pitanje koje pronicljiv fizičar ovde može postaviti je: „Kako rotacija crne rupe uopšte utiče na prostor-vreme van crne rupe ako je rotacija unutrašnje svojstvo a znamo da nikakva informacija ne može napustiti crnu rupu?“

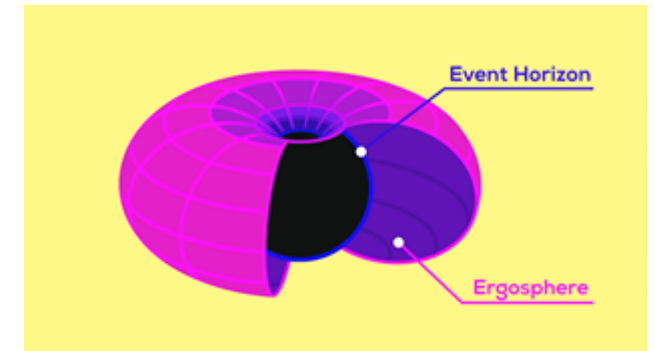


Slika 2 - Rotirajuća crna rupa „vuče“ prostor vreme za sobom u krug

Odgovor na ovo pitanje se krije u činjenici da je crna rupa ništa drugo nego samoodrživa rupa u prostor-vremenu. Dobra analogija su voda i slivnik - molekuli vode ne zna da postoji rupa, on samo prati okolno ponašanje vode. Na taj način i prostor-vreme u obliku vrtloga „cure“ u crnu rupu pa je pravilnije reći da rotira prostor-vreme, a ne sama crna rupa! Ovaj fenomen se još naziva i efekat povlačenja koordinatnog sistema odnosno „frame dragging“.

U oblasti iznad horizonta događaja Kerove crne rupe, nalazi se region svemira koji je posebno neobičan po tome što se usled frame dragging-a, prostor vrta oko crne rupe brže od brzine svetlosti! Ovaj region, inače torusnog oblika, se naziva ergosfera. Vrlo slično tome kako ispod horizonta događaja radijalna prostorna koordinata postaje „vremenskog tipa“, tako u ergosferi ugaona koordinata postaje „vremenskog tipa“ što uslovljava nužnost rotacije oko crne rupe. Upravo ovaj prelaz ugaone koordinate sa prostornog na vremenski tip nam u teoriji dozvoljava da crpimo energiju iz

crne rupe. Štaviše, dozvoljava nam da ekstrahujemo tolike količine energije da je moguće uništiti čitave galaksije u eksploziji koja bi zasenila i najjaču supernovu!



Slika 3 - Ergosfera

Ukoliko bi bomba od crne rupe bila deklarirana kao izum, patent bi pripao nikom drugom nego velikom Rodžeru Penrouzu, dobitniku Nobelove nagrade za fiziku 2020. godine, koji je otkrio da je formacija crne rupe robusna predikcija Opšte teorije relativnosti.

Penrouz je osmislio način kako ekstrahovati energiju iz Kerove crne rupe. Pojednostavljeno, ideja kaže da ukoliko pustimo objekat da spiralno pada u crnu rupu na precizno ustanovljenoj putanji i u tačno izračunatom trenutku ga prepolovimo dok je u ergosferi, jedan deo će upasti u crnu rupu, a drugi je napustiti sa kinetičkom energijom većom nego što je imao pri ulasku. Ova energija dolazi iz rotacije crne rupe što znači da nakon što je objekat napusti, crna rupa malo uspori svoju rotaciju. Međutim, ovaj efekat ne važi samo za masene objekte! Ukoliko bismo uzeli baterijsku lampu i uperili je u ergosferu, fotoni bi doživeli istu sudbinu kao i bačeni i prepolovljen kamen u ergosferi - svetlost bi napustila ergosferu pojačana, a ovaj efekat se zove **superradijansa**.

I upravo je ovo ključni sastojak za pravljenje džinovske bombe od crne rupe!

Sada znamo šta su Kerove crne rupe, šta je i kako funkcioniše ergosfera i kada imamo metod da iz crne rupe izvučemo energiju i damo je fotonima, sve što nam preostaje je da oko crne rupe napravimo ogledalo koje će odbegle fotone da vraća na novo pojačanje, iznova i iznova, sve dok se energija nagomilana u njima eksponencijalno pojačava do te mere da se međumolekulske veze u ogledalu cepaju usled intenziteta svetlosti pojačane u crnoj rupi i dolazi do nezamislive eksplozije galaktičkih razmera!

Eto, ovo je recept kako napraviti galaktičku bombu u sopstvenom svemirskom dvorištu! Sve što vam treba je jedna crna rupa, ogromno ogledalo i baterijska lampa. Ipak, ukoliko vam je ovo ispunilo apetit za destrukcijom kosmičkih razmera i sada polako počinjete da razmišljate konstruktivno, hajde da pogledamo kako se ovaj efekat može upotrebiti u mirnodopske svrhe za napajanje jedne svemirske civilizacije energijom.

Zapravo, proces je gotovo identičan. Jedina razlika je u tome što je poželjno napraviti nekoliko otvora u ogledalu pre nego što fotoni dostignu kritičnu energiju. Na taj način bi se stvorio dugotrajan izvor svetlosti ogromnog intenziteta koji bi mogao da zadovolji potrebe čitave civilizacije i to milenijumima!

I možda jednog dana, baš ovo bude poslednji izvor svetlosti koji će obasjavati čovečanstvo dok se univerzum oko nas bude polako gasio.

Autor: Jovan Mitić, student FF



ŠTA JE FORENZIČKA UMETNOST?

Za ljubitelje krimića i misterija, danas imamo poslasticu! Znete li onaj momenat u serijama kad se ustanovi da je neko umetničko delo zapravo falsifikat? Na prvi pogled nikad ne biste rekli, ali fizika je i tu umešala svoje prste.

Naravno, nije sve u serijama prikazano verodostojno, ali razotkrivanje misterija u stvarnosti je još zabavnije. Te scene iz serija mogu se desiti u realnom svetu i zato je forenzička umetnost važna. Forenzička umetnost primenjuje metode fizike u cilju provere autentičnosti dela. Statistika pokazuje da je negde 20% dela kojima se danas trguje zapravo falsifikovano, pa je forenzička umetnost izuzetno važna za tu oblast, s obzirom na to koliko vrednost može imati jedno umetničko delo.

Bacimo pogled na jednu sliku. Šta ne vidite? Samu sliku je lako razgledati, ali šta možemo saznati o upotrebljenom materijalu? Na kakvom platnu je naslikana? Kakve boje su korišćene, koji pigmenti su prisutni? Nije toliko poznato da svaki umetnik ima karakteristične pigmente koje koristi, a to predstavlja lični pečat taman kao i otisak prsta. Bacite pogled na slike ispod. Već na prvi pogled prepoznajete autora, jer je tu njegov karakterističan pečat u vidu korišćenih boja.

Dakle, sliku je moguće falsifikovati, ali ne i sve ono što je karakteristika umetnika i vremena u kome je on stvarao. Postoje metode koje su fizičke, a omogućavaju neinvazivnu analizu dela. Neinvazivne metode su one koje ne zahtevaju uzimanje uzoraka. Ovo je od značaja kako ne bi došlo do oštećenja što bi predstavljalo nemerljivu štetu i civilizacijski gubitak. Postoje najmanje četiri razloga zbog kojih restoratore zanima identifikovanje pigmenata:

1. odlučivanje da li restauraciju obaviti uz upotrebu originalnog pigmenta ili je neophodno naći zamensku boju slične nijanse;
2. videti da li je i koliko propala boja i koji su prisutni proizvodi degradacije;
3. ustanoviti paletu korišćenih boja koja bi potvrdila ili opovrgla autorstvo;
4. utvrditi pripadnost umetničkom pravcu, školi, godini nastanka.

Pored ovoga, najvažnije je identifikovati poreklo pigmenta i proveriti kolike su i kakve degradacije na delu.

Za proučavanje pigmenata najbolje je primeniti spektroskopske metode. Izbor metode zavisi od mnogih faktora, ali je najvažnija njegova preciznost i primenljivost u određenom slučaju.

Dosad je već jasno da je identifikacija pigmenata na spisima, slikama, keramici, ikonama i papirusima od vitalnog značaja kako bi delo nastavilo da živi. Najpoznatija metoda uključivala je korišćenje Ramanove spektroskopije koja se zasniva na Ramanovom efektu.

Ramanov efekat ili Ramanovo rasejanje je neelastično rasejanje svetlosti, odnosno fotona na nekom materijalu. Pošto je reč o neelastičnom rasejanju, to navodi na zaključak da dolazi do razmene energije. Nakon rasejanja, fotoni imaju manju energiju, a razmenjena energija odlazi vibracionim nivoima molekula materijala. Ova pojava je otkrivena 1928. godine, a Raman je za svoje otkriće dobio Nobelovu nagradu 1930. godine.

Mnoga umetnička dela analizirana su metodom zasnovanom na ovom efektu, ali svakako su najpoznatiji slučajevi vezani za Van Goga i tri njegove slike u muzeju u Amsterdamu. Bilo je neophodno restaurirati slike, a analizom je uočena tačna nijansa plave boje koju je koristio Van Gog u mnogim svojim delima. U Amsterdamu danas postoji muzej posvećen životu i delu Vinsenta van Goga. Na njegovim delima primenjujane su Ramanova i infracrvena spektroskopija.

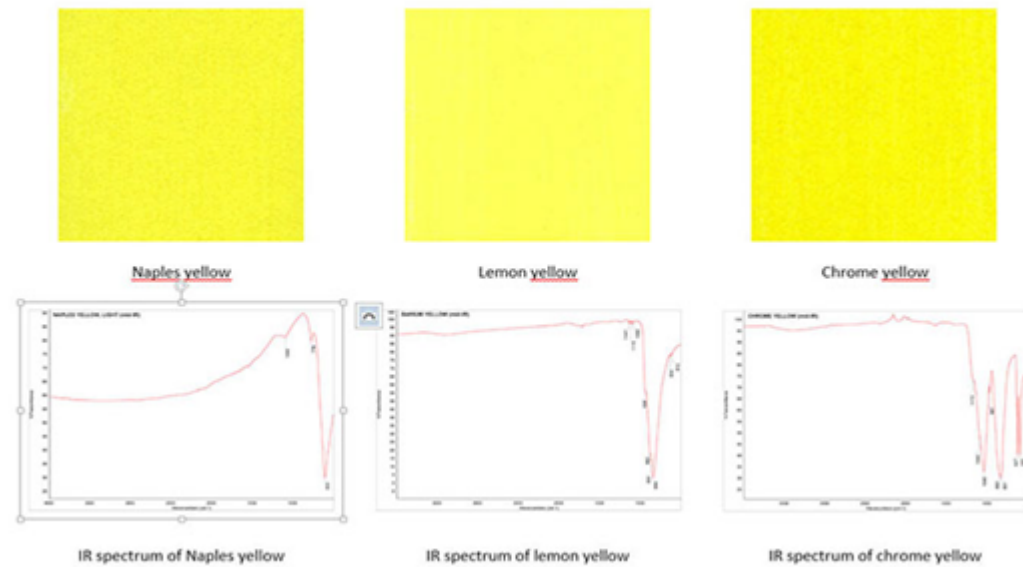
Ramanova spektroskopija i mikroskopija čine jednu veliku grupu metoda zajedno sa nekoliko vibracionih metoda. Ovi metodi bave se analizom uzoraka, tj. molekulskim sastavom i osobinama materijala. Njena najvažnija prednost je što ne zahteva uzimanje uzoraka iz umetničkog dela, tj. nije neophodno oštetiti sliku ili bilo koji drugi artefakt. Ostale prednosti ove metode su visoka prostorna i spektralna rezolucija, senzitivnost i preciznost. Pored ovih prednosti može doći do poteškoća kada su u pitanju određeni organski pigmenti i vezivna sredstva koji su fluorescentni ili fotosenzitivni, jer onda dolazi do smanjenja efektivnosti ove metode. U tom slučaju neophodno je kombinovati Ramanovu spektroskopiju sa drugim metodama koje bi otklonile smetnje ovog tipa.

Postoji još jedna metoda koja se često primenjuje u analizi pigmenata i to je infracrvena spektroskopija. Ovaj metod funkcioniše tako što se uzorak osvetli svetlošću čija je talasna dužina u opsegu od 1000 do 4000 nm. Deo zračenja biva apsorbovan od strane uzorka zbog oscilovanja molekula ili jona prisutnih u uzorku. Ove oscilacije zavise od strukture molekula i zato su jedinstvene za svaki materijal.

Kada uzorak apsorbuje energiju, dolazi do prelaza elektrona iz jednog nivoa u drugi unutar atoma ili molekula. Dalje ćemo samo reći da su rezultati tih prelaza zapravo spektri na kojima se vidi prisustvo tačno određenih talasnih dužina svetlosti, a to je karakteristika materijala. Kad se utvrdi koje talasne dužine su dobijene u spektru, tada se sa sigurnošću može utvrditi prisutnost pojedinih supstanci.

Ako mislite da je ovo kraj našeg puta, varate se. Dvadeset prvi vek i razvoj kompjutera doneli su nam dodatne mogućnosti. Danas pored boje možemo analizirati i način na koji je slika naslikana, tj. možemo analizirati poteze četkice. Potezi su jedinstveni kao i rukopis, a upravo zato možemo napraviti algoritme za prepoznavanje i poređenje istih.

O tome ćete čitati u narednom broju.



Slika 1: infracrveni spektri za različite nijanse žute boje



Slika 2: Anri Matis, Radost života



Slika 3: Vinsent van Gog, La Mousmé (1888) (njena kompozitna struktura nakon osvetljenja infracrvenim zracima)

Izvori:

1. Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis
2. Multispectral Imaging of Paintings in the Infrared to Detect and Map Blue Pigments; John K. Delaney, Elizabeth Walmsley, Barbara H. Berrie, and Colin F. Fletcher
3. Infrared Spectroscopy | ColourLex

Autor: Irina Ručnov, studentkinja FF

Edington i Strela vremena

Iako je priroda vremena dugo bila predmet istraživanja filozofa, pitanje o usmerenosti vremena odnosno streli vremena, kako ga danas shvatamo, se javlja relativno kasno i više je rezultat napredaka u fizici nego same filozofske aktivnosti. Za postavljanje pitanja zašto je vreme usmereno neophodno je bilo uočiti simetriju u mogućem protoku vremena koja kao moguće pitanje lako izmiče zdravorazumskom ali i filozofskom oku. Nigde se ova moguća izotropija vremena bolje ne uočava nego u klasičnoj mehanici gde se jasno vidi da je svaki proces opisan jednačinama kretanja simetričan u vremenu, to jest da može smisljeno da se odigrava u suprotnom smeru. S druge strane, relativno nezavisan razvoj termodinamike je omogućio nastajanje zakona poput Karnoovog principa o najefikasnijem motoru koji je, više slučajno, doveo u samu srž fizike ideju o ireverzibilnim procesima i o jednosmernosti vremena. Kasnije su teorijskom analizom drugog principa termodinamike, koji je izrastao iz Karnoovog principa, fizičari Maksvel, Klauzijus, Bolcman i Gibbs, uz razvitak statističke mehanike, došli do formalnijih definicija gde se još očiglednije vidi emergencija strele vremena i gde je prvi put "kvantifikovana ireverzibilnost" procesa. Upravo su ova otkrića, to jest sama tenzija između reverzibilne mehanike i ireverzibilne termodinamike ono što je stvorilo plodno tlo za razvoj diskusije o nesimetričnosti protoka vremena.

Edington i strela vremena

Prvi put pojam strela vremena koristi u svojoj knjizi "Priroda fizičkog sveta" Artur Edington, 1928. godine. On se u tom radu bavi analizom velikih skorašnjih dostignuća u svetu nauke (Opšta teorija relativnosti, Kvantna mehanika, Zakoni termodinamike) i govori o njihovim filozofskim implikacijama na razumevanje sveta u kome živimo. Pritom moramo imati u vidu da je on ovu knjigu napisao nakon neverovatnih eksperimentalnih potvrda OTR-a, u kojima je i on sam učestvovao. Tumačenje prostor-vremena Minkovskog i postavljanje pitanja o njegovom ontološkom karakteru postalo je jedan od centralnih filozofskih problema s obzirom da je uvođenje prostor-vremena kao postulata, po Ajnštajnovim pravilima, bilo veliki uspeh i doživelo značajne empirijske potvrde. Edington tu kao značajan problem vidi određenu nepokretljivost i statičnost prostor-vremena Minkovskog ali i neusmerenost vremena koja je inače očigledna u drugom principu termodinamike, a i u ličnom iskustvu. On se u četvrtom poglavlju ove knjige "Urušavanje univerzuma" bavi upravo usmerenošću vremena i prvi je koji eksplicitno i sistematski govori o ovoj temi. Iako su naučnici pre njega promišljali šta znači ireverzibilnost procesa, niko nije izvršio sistematsku filozofsku analizu tog pitanja.

Klauzijus, koji je prvi omogućio kvantifikovanje ireverzibilnosti definisanjem entropije, je želeo, po svojim rečima, da: “razdvoji svoja ontološka verovanja od zvaničnih stavova o principima termodinamike jer ne želi da ih uprlja spekulativnim karakterom svojih verovanja”.

Isprva Edington daje nekoliko primera gde se jasno uviđa ireverzibilnost prikazanih procesa poput pada kamena na tlo, ili nesvesnog, nekontrolisanog mešanja špila karata i daje neku vrstu definicije ireverzibilnosti: “Kad god se desi nešto što ne može da se poništi, to uvek može da se redukuje na uvođenje slučajnog elementa analogno onom koji se javlja pri mešanju”. U ovoj definiciji pojam **slučajni element** ostaje nejasan i ta nejasnost se proteže kroz čitavu diskusiju ove teme. Uvodi i pojmove “događanje” kao niz stanja koji se odvija od prošlosti ka budućnosti i “ponišćavanje” kao isti niz stanja koji se odvija od budućnosti ka prošlosti. O streli vremena prvi put eksplicitno govori na sledeći način:

“**Strela vremena:** Važna stvar kod vremena je da ono protiče. Ali ovo je njegov aspekt koji izgleda da fizičari često zapostavljaju. U četvorodimenzionalnom svetu događaji prošlosti i budućnosti su prostrti pred nama kao na mapi. Događaji se nalaze na sopstvenim prostornim i vremenskim pozicijama; ali nema indikacije da oni prolaze kroz ono što bismo nazvali “formalnost zauzimanja mesta” i pitanje njihovog događanja ili poništavanja se ne javlja. Mi na mapi vidimo put od prošlosti ka budućnosti, odnosno od budućnosti ka prošlosti; ali ne postoji znak koji bi ukazao da je taj put u jednom smeru. Nešto mora biti dodato geometrijskoj koncepciji koju sadrži prostor-vreme Minkovskog pre nego što ono postane potpuna slika sveta kakvog znamo.”

Moramo imati na umu da ovde već uočavamo dva aspekta (elementa) strele vremena koje ni sam Edington ne razlikuje, a podrazumeva. Jedan element koji nedostaje prostor-vremenu Minkovskog je događanje ili postajanje odnosno dinamički kvalitet - pokretljivost vremena - činjenica da vreme protiče (makar u našem subjektivnom iskustvu) u smislu u kom to nije slučaj s prostorom. Pritom ovde je važno da se napravi razlika u proticanju vremena i u kontinualnosti vremena koja je svojstvena i prostoru za razliku od proticanja. Drugi element je ono što daje smer vremenskoj osi u prostor-vremenu i pravi razliku između prošlosti i budućnosti. Edington misli da oba ova elementa fale slici sveta Minkovskog i da fizika treba da ih vrati nazad u sliku sveta, a s obzirom da ih ne razlikuje misli da se to postiže jednim fizičkim postulatom ili entitetom. Hju Prajs u svom radu o Edingtonovom shvatanju strele vremena tvrdi da je važno i korisno da ih razlikujemo jer se u različitim filozofskim diskusijama o prirodi vremena možemo odreknuti jednog od navodnih svojstava strele vremena a ne i oba. Možemo argumentovati da je protok vremena subjektivan, (da ne možemo da znamo da li je vreme protočno) i da njime fizika ne treba da se bavi, kao što Herman Vejl kaže: “Objektivni svet prosto jeste, on se ne događa. Samo u mojoj svesti se deo ovog sveta javlja kao pokretna slika prostora koja se kontinualno menja u vremenu”. Međutim i kada bi to bilo tačno to ne bi značilo da moramo da se odrekemo ideje da postoji nešto što razlikuje jedan smer vremena od drugog, što ređa događaje na vremenskoj osi od prošlosti ka budućnosti, to jest omogućava da smisljeno jedan događaj nazovemo prošlošću (ili budućnošću) u odnosu na drugi, iako samo vreme nije protočno između njih. Ali, s druge strane ukoliko eliminišemo protočnost kao aspekt strele vremena sam pojam prošlosti i budućnosti kao da gubi na smislu i postaje samo relaciona oznaka između dva događaja (tačke u prostor-vremenu) koja ih razlikuje po nekom svojstvu, u ovom slučaju na osnovu nivoa uređenosti posmatranih sistema oko tog događaja (iz te tačke prostor-vremena). Međutim ništa nas ne ograničava da definišemo neko drugo relaciono svojstvo na osnovu koga ćemo da poredimo dve tačke prostor-vremena u kom uvodimo neku drugu smislenu relaciju između svih tački prostor-vremena na osnovu tog svojstva. Ideja o ređanju događaja na vremenskoj liniji, od prošlosti ka budućnosti, postaje potpuno akcidentalna i entropija postaje veličina kojoj je iz nekog razloga

prilagođena naša svest. Mi se ovde fokusiramo na ovo drugo svojstvo, svojstvo usmerenosti vremenske ose, a ne na samu ideju o protočnosti vremena.

Dalje Edington daje jednostavan kriterijum koji omogućuje davanje smera vremenu. “Bez ikakvog mističnog apelovanja na svest moguće je naći smer vremena na četvorodimenzionalnoj mapi proučavanjem organizovanja. Nacrtajmo proizvoljnu strelu. Ako praćenjem i kretanjem po streli nailazimo na sve više slučajnog elementa u stanju prostor-vremena u kom se nalazimo, onda je ta strela vremena usmerena ka budućnosti, ako slučajni element opada onda je strela usmerena ka prošlosti. Ovo je jedina razlika poznata u fizici. Ovo sledi ako prihvatimo fundamentalnu izjavu da je uključivanje slučajnosti jedino što ne može biti poništeno”. Ovo znači da posmatranjem stanja okolnih sistema iz proizvoljnih tačaka prostor-vremena možemo da uočimo koja predstavlja prošlost u odnosu na drugu. Ovde međutim nejasnost pojma slučajni element pravi još veću pometnju, koju je Edington donekle razjasnio svojom diskusijom o termodinamici.

Edington u svojoj knjizi nije napravio distinkciju između različitih perspektiva na usmerenost vremena, strelu vremena, ali se manje ili više dotakao njih, posebno termodinamičke strele vremena. Više o različitim tipovima strele vremena su pisali kasniji naučnici i filozofi između ostalih i Stiven Hoking koji je izdvojio tri tipa. To su Termodinamička, Psihološka i Kosmološka strela vremena. Posebno je komplikovan odnos prve dve što je donekle i Edington najavio.

Termodinamička strela vremena

Kao što smo već prikazali ova strela vremena se javlja usled toga što drugi princip termodinamike za razliku od svih fizičkih zakona prirode (osim možda kvantne mehanike i procesa kolapsiranja talasne f-je) nije simetričan u odnosu na protok vremena. Kada bi vreme teklo u suprotnom smeru i u jednačinama kretanja infinitezimal protoka zamenili sa $-dt$ umesto sa dt drugi princip termodinamike ne bi važio, dakle drugi princip termodinamike nije T-simetričan. Ova strela vremena je ona koja je i bila jedna od početnih pokretača za stvaranje ideje o streli vremena uopšte, a i danas celokupnu usmerenost vremena neki fizičari i filozofi shvataju isključivo kao posledicu termodinamičke usmerenosti. I sam Edington je imao slično stanovište o njegovoj važnosti i tačnosti “..Ali ako se tvoja teorija protivi drugom zakonu termodinamike nemoj da se nadaš, njoj ništa drugo ne može da se desi osim da propadne u najdubljoj sramoti”. Uz to mora da se doda da je na nekim mestima sumnjao da postoji još nešto uz to, esencijalno za usmerenost vremena.

Za ilustraciju ove strele vremena najčešće se daje sledeći primer. Uključimo neki film i posmatrajmo ga kako se odvija unazad od kraja do početka. U najvećem delu vremena sve što vidimo će se u potpunosti slagati sa fizičkim zakonima poput kretanja jednog tela (iako bi bilo iznenađujuće videti ljude koji hodaju unazad to ne narušava nikakve fizičke zakone i moguće je u stvarnom svetu). Jedino gde ćemo uvideti problem je u procesima poput lomljenja čaše ili mešanja mleka s kafom gde će se obrnut proces s razlogom učiniti besmislenim. Besmisleno je da se ovi procesi odvijaju u suprotnom smeru samo zato što u njima dolazi do povećanja ukupne entropije i suprotan smer narušava drugi princip termodinamike.

Međutim, iako je bilo jako mnogo uspeha ovakvog shvatanja usmerenosti vremena bilo je i kritika a jedna od najvažnijih se ogleda u Lošmidtovom paradoksu koji zapravo izražava već spomenutu tenziju između mehanike i termodinamike i formulisan je još 1876. On kaže da ne bi trebalo da je moguće dedukovati ireverzibilan proces iz vremenski simetrične dinamike kao što je naša. Ovo stavlja u problem simetričnost vremenskog toka koja se javlja kod svih mikroskopskih fundamentalnih procesa sa bilo kakvim pokušajem da iz njih izvedemo drugi princip termodinamike koji opisuje ponašanje

makroskopskih sistema. Obe ove teorije su prihvaćene i uspešno dokazivane u fizici, ali izgleda da su u kontradikciji, što je paradoks. Iako su dati neki odgovori ovaj paradoks je opstao do danas i postoje fizičari i filozofi koji smatraju da od tad nije dostignut neki smislen napredak u njegovom rešavanju.

Takođe je zanimljiv rad Josa Ufinka koji kaže da zapravo vremenska ireverzibilnost nije inherentna drugom principu termodinamike jer postoje mnoge njegove formulacije koje je nigde i ne spominju. On tvrdi da je takvo uobičajeno povezivanje strele vremena sa Drugim principom termodinamike više samo opšte prihvaćeno mišljenje u naučno-filozofskoj zajednici koje tek treba da se preispita i analizira.

Psihološka strela vremena

Edington govori u prilog usmerenosti vremena uz komentar da je svest intenzivno doživljava i da bi obratan smer vremena u našoj svesti bio potpuno besmislen. Psihološka strela vremena se odnosi na smer u kom doživljavamo da vreme teče i možda je najočiglednija od sve tri jer stalno u svesnom iskustvu različito doživljavamo prošlost i budućnost. Avgustin je rekao: “...netačno se izražavaju oni koji govore da postoje tri vremena: sadašnje, prošlo i buduće. Tačnije bi, čini se, bilo reći ovako: postoje tri ovakva vremena: sadašnje koje se odnosi na prošle stvari; sadašnje koje se odnosi na sadašnje stvari; i sadašnje koje se odnosi na buduće stvari. Odista, ta tri objekta postoje samo u našoj duši, i ja ih ne vidim nigde sem u njoj: sadašnjost prošlih stvari sastoji se u sećanju; sadašnjost sadašnjih predmeta u posmatranju; a sadašnjost budućih vremena u očekivanju”. Ove Avgustinove reči mogu da se svedu na dve tvrdnje: prva je tipična prezentistička tvrdnja da je sadašnjost jedino što postoji; a druga je subjektivistička tvrdnja da je vreme izrazito psihološko, da ne postoji, osim kao način na koji ljudi organizuju iskustvo. Ovo predstavlja korisno polazište kao idealistička perspektiva na psihološko vreme. Ako i pretpostavimo da je Avgustin u pravu kada veruje samo u postojanje trenutaka doživljaja kao i u subjektivnu prirodu vremena, što i nije predmet naše analize, ostaje neodgovoreno pitanje zašto je “protezanje samog duha” usmereno, odakle potiče ta primećena razlika između sadašnjosti, prošlih i budućih stvari. Zašto se prošlih stvari sećamo a buduće stvari očekujemo i zašto iskustva uopšte organizujemo na taj način. Usmerenost vremena je neobjašnjena karakteristika Avgustinovog subjektivističkog vremena.

Ovde bih naveo zanimljiv primer, iz filma Dolazak, iz 2016, koji može da osvetli poreklo psihološke strele vremena ako shvatimo vreme subjektivistički. U tom filmu Zemljani dolaze u kontakt sa Vanzemalcima i pokušavaju da uspostave kontakt učeći njihov jezik. Nakon određenog vremena, glavna junakinja, lingvistkinja Luiz, uspeva da nauči njihov jezik. Međutim, to kod nje izaziva i drugu promenu a to je da joj se potpuno izmeni percepcija protoka vremena i ona počinje da ima sećanja iz budućnosti”. Iako ovaj primer predstavlja jaku i možda nerealističnu ekstrapolaciju Sapir-Vorfove hipoteze o uticaju jezika koristan je za ilustriranje teze da je način protoka psihološkog vremena kulturno uslovljena slučajnost. Ovo je korisno dopunjenje Avgustinove idealističke i subjektivističke perspektive i objašnjava razliku prošlosti i budućnosti kao kulturno uslovljenu. Takođe, zanimljivo je da se u najvećem broju jezika (posebno indoevropskih) smer vremena ka budućnosti poredi sa prostornom odrednicom napred, a smer ka prošlosti sa nazad. Međutim, to nije pravilo. Na primer u jeziku Ajmara važi obratno. Dakle zasigurno postoje određeni doživljaji protoka vremena koji su arbitrarni i kulturno određeni.

Međutim, do sada nismo naišli na grupu ljudi, a ni drugih organizama, koja ima drugačiju percepciju smeru vremena. Čini se da ipak postoji neko pravilo kako svi doživljavaju usmerenost vremena koje je više od slučajnosti. Na ta pitanja o usmerenosti psihološkog vremena bolje odgovara materijalistička perspektiva psihološkog vremena koju je izložio Hoking.

On je dokazivao da samim tim što je čovek materijalno biće, uključujući i njegov mozak, podređen Drugom principu termodinamike i Termodinamičkoj streli vremena, iz koje potom proizilazi Psihološka strela vremena. Hokingov argument je:

1. Proces memorisanja kod kompjutera se odvija uz utrošak energije i oslobađanje toplote, dakle uz povećanje entropije, u pozitivnom termodinamičkom smeru;

2. Proces memorisanja kod ljudi može da se posmatra kao proces memorisanja kod kompjutera;

3. Proces memorisanja kod ljudi se odvija u pozitivnom termodinamičkom smeru i određen je termodinamičkom strelom vremena. Memorišemo prošlost određenu na osnovu drugog principa termodinamike.

Dakle ukoliko su tačni iskazi 1. i 2. tačan je i iskaz pod 3. Prvi iskaz zapravo predstavlja Landauerov princip koji formalno pokazuje da memorija kompjutera može da radi samo u smeru povećanja entropije i više puta je potvrđivan kao tačan. Drugi iskaz je onaj koji može naučno i filozofski da se posmatra kao upitan usled nedovoljno razvijenih naučnih shvatanja memorisanja kod ljudi. Za potvrđivanje drugog iskaza Hoking navodi to da se, makar što se tiče procesa memorisanja, kompjuteri ponašaju kao ljudi jer još nije otkriven kompjuter koji spoznaje budućnost već kao i mi svaki memoriše prošlost kako je mi doživljavamo i u skladu s nama. Ukoliko prihvatimo ovaj dokaz, prihvatamo da je psihološka strela vremena može da se redukuje na termodinamičku, što opet ukazuje na fundamentalnost termodinamičkog usmerenja vremena.

Međutim, kao što smo već rekli, entropija nije nikakva ekstenzivna veličina koja postoji nezavisno od ljudi, nema svoj supstrat. Ona nam omogućuje da u određenom trenutku (tački prostor-vremena) na određeni sistem oko nas nalepimo brojnu vrednost. Mi smo je definisali tako da brojne vrednosti koje dodeljujemo izolovanim sistemima uvek budu veće od one dodeljene tom sistemu prethodnog trenutka koji je u našem pamćenju. Tek onda smo počeli da opravdavamo zasnovanost koncepta kroz mikro statističku fiziku (sa ograničenim uspehom) preko “neuređenosti” ili “mere korisnog rada”. Dakle ako entropiju definišemo kao rastuću veličinu između trenutka merenja i onog merenja u pamćenju a onda njen porast koristimo da opravdamo smer u kom pamtimo završavamo u cirkularnom objašnjenju?

Zaključak

Često se u naučnim, ali i filozofskim krugovima priča o Teoriji svega koja će objasniti sve pojave i na koju će se redukovati i Opšta teorija relativnosti i sve moderne Kvantne teorije. Važno je podsetiti se da u tu teoriju treba da redukujemo i Drugi princip termodinamike, to jest samo shvatanje usmerenosti vremena i da izgradimo ozbiljno razumevanje strele vremena koje nam i dalje izmiče. Karlo Roveli je na predavanju u Kraljevskom Institutu rekao da je usmerenost vremena možda jedina karakteristika vremena na koju najlakše objektivno možemo da ukažemo, usled slabljenja ideja o postojanju istovremenosti i protočnosti. Dakle dalji odgovori na ovu temu će biti ključni za razumevanje ne samo protočnosti, nego i vremena uopšte.

Autor: Jordan Grujić, student FF