

100 godina teorije relativnosti

Predrag Prester

Max Planck Institute for Gravitational Physics
(Albert Einstein Institute), Potsdam

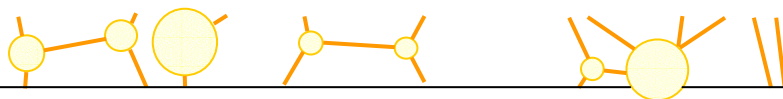
Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ove godine se navršava 100 godina od kada je Albert Einstein objavio tri epohalna rada; o specijalnoj teoriji relativnosti, fotoefektu te o Brownovom gibanju. I iako se često kaže da je svaki od tih radova pojedinačno toliko važan da zaslužuje Nobelovu nagradu (koju je A. Einstein i dobio 1921. za objašnjenje fotoefekta), po svom utjecaju na naše razumijevanje ustrojstva svijeta i svemira posebno se ističe teorija relativnosti. Jedan razlog tome je što ona govori o strukturi prostora i vremena, i kao takva je utkana u sve modele kojima danas opisujemo fundamentalne sile. Drugi je što je teorija relativnosti (pogotovo opća koja uključuje i gravitaciju) donijela radikalnu promjenu u našem razumijevanju prostora i vremena, koji prestaju biti statični i odvojeni, i postaju nerazdvojno vezani u dinamični prostorno-vremenski kontinuum. Da bi razumjeli promjene koje je donijela teorija relativnosti potrebno je prvo se podsjetiti fizikalnog opisa prostora i vremena prije 1905.

Galileo-Newton-Maxwell

Fizika 19. stoljeća je bila zasnovana na Newtonovoj mehanici i gravitaciji, te teoriji elektriciteta i magnetizma koju je formulirao u konačnom obliku James C. Maxwell. U toj slici svijeta materija i polja su "uronjeni" u prostor i mijenjaju se u vremenu. Prostor je trodimenzionalni kontinuum, što znači da za određivanje položaja nekog točkastog tijela (relativno u odnosu na neko proizvoljno ishodište) trebamo tri realna broja, tzv. prostorne koordinate (jer postoje tri nezavisna smjera: naprijed-natrag, lijevo-desno, gore-dolje). Vrijeme je jednodimenzijski kontinuum, što znači da za određivanje trenutka kada se tijelo nalazilo u danoj točki trebamo jedan realni broj (trebamo očitati vrijeme na satu). Sami za sebe prostor i vrijeme su nepromjenljivi.

U ovoj slici vrijeme je *apsolutno* – ako dvije osobe uzmu dva jednaka sata koja su jednako podešena te se potom raziđu i nakon nekog vremena ponovo sretnu, njihovi satovi će pokazivati isto vrijeme, bez obzira kakvo gibanje osobe izvode (naravno pod uvjetom da su satovi dovoljno čvrsti da ubrzavanje ne poremeti njihov rad). Slično je i prostor apsolutan – dvije osobe koje dobiju identične štapove, raziđu se i ponovo prolete jedan pored drugoga, će ustanoviti da su im štapovi i dalje iste duljine.



Specijalna teorija relativnosti

Krajem 19. stoljeća fizičari Michaelson i Morley vršili su ekperimente u kojima su mjerili ovisnost brzine svjetlosti (emitirane iz izvora koji miruje na Zemlji) o smjeru u kojem putuje. Naime, pošto se Zemlja vrti oko Sunca brzinom otprilike 30 km/s (što je više od 100000 km/h), Sunčev sustav se vrti oko centra naše galaksije (Mliječnog puta), koja se pak giba u odnosu na druge galaksije u našoj nakupini galaksija, očito je da jednostavni zakon o zbrajanju brzina predviđa ovisnost o smjeru. No, u navedenim (vrlo preciznim) eksperimentima nije se uočila nikakva razlika u brzini svjetlosti emitirane u različitim smjerovima.

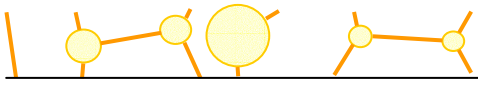
Iako su brojni fizičari pokušavali objasniti rezultate Michaelsona i Morleya različitim (kompliciranim) teorijama, tek je Einstein shvatio da naprosto treba jednostavno uzeti ono što su eksperimenti govorili: *Iznos brzine svjetlosti (u vakuumu) ne ovisi o gibanju izvora svjetlosti*. No, pokazuje se da ta jednostavna pretpostavka povlači za sobom potpuno nova svojstva prostora i vremena, koji prestaju biti apsolutni i postaju *relativni*:

- Prostorno udaljeni događaji koji su istovremeni za jednog promatrača, neće biti istovremeni za drugog koji se giba nekom brzinom u odnosu na prvog
- Jednaki satovi koji se razdvoje i izvode različito gibanje, ukoliko se ponovo sretnu neće pokazivati isto vrijeme (čuveni paradoks blizanaca)
- Štap koji se giba izgledat će kraći od istog takvog ali koji miruje
- Prostor i vrijeme postaju povezani – relativnost vremena je kroz relativnost istovremenosti povezana sa relativnosti prostora. Govorimo o prostor-vremenu kao o četverodimenzionalnom kontinuumu
- Fizikalne informacije se ne mogu prostirati brže od svjetlosti u vakuumu
- Masa je oblik energije i može se pretvarati u druge oblike energije

Više detalja o specijalnoj teoriji relativnosti možete naći u bilješkama I. Piceka.

Uključivanje gravitacije - opća teorija relativnosti

Vrlo brzo nakon formulacije specijalne teorije relativnosti, Einstein je uočio da ona i Newtonova teorija gravitacije nisu u skladu. Jedan razlog je odmah vidljiv – u Newtonovoj teoriji gravitacijska sila između dvije mase djeluje trenutno na daljinu, što je u neskladu sa tvrdnjom da se nikakav fizikalni učinak ne može prenijeti brže od svjetlosti. Također, mjerenja precesije Merkurovog perihela su davala bitno veću brzinu od one koju je predviđala Newtonova teorija gravitacije. Formulacija relativističke teorije gravitacije je bio težak problem za koji je Einsteinu (uz pomoć matematičara Hilberta) trebalo 10-tak godina da ga u potpunosti riješi. No, zato se konačni rezultat, poznat pod nazivom opća teorija relativnosti, smatra jednim od najvećih i najljepših dostignuća znanosti uopće.



Pošto je Newtonova teorija prilično precizno opisivala putanje planeta u Sunčevom sustavu, bilo je jasno da nova teorija mora nekako sadržavati neke elemente stare teorije. Jedno od posebnih svojstava Newtonove teorije je da putanja tijela na koje djeluje samo gravitacijska sila ne ovisi o njegovoj masi. To se lako vidi koristeći Newtonov drugi zakon te izraz za gravitacijsku silu kojom točkasta tijela masa M_j , koja se nalaze u točkama prostora određenim radij-vektorima $\vec{r}_j$ djeluju na točkasto tijelo mase m koje se nalazi u točki određenoj sa $\vec{r}$:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{grav} = \sum_j G_N \frac{mM_j}{(\vec{r} - \vec{r}_j)^2}$$

Kada podijelimo gornju jednadžbu sa m ona više u opće ne sadrži masu promatranog tijela, što znači da putanja čestice (koja se dobije rješavanjem gornje jednadžbe) neće ovisiti o njenoj masi (a ni drugim svojstvima). Einstein je zaključio da to svojstvo treba vrijediti i u novoj teoriji, i u njenoj konstrukciji krenuo od slijedećeg postulata:

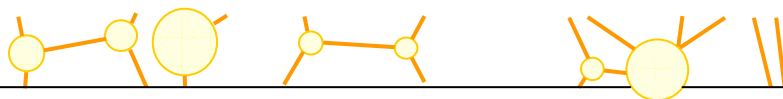
Sva tijela koja se nalaze pod utjecajem isključivo gravitacijske sile gibat će se na istovjetan način.

Krećući od gornjeg postulata i zahtjevajući pri tom također:

- Pri malim brzinama (puno manjim od brzine svjetlosti) te slabim gravitacijskim djelovanjem (kakvo je npr. između Sunca i planeta) nova teorija se mora svoditi na Newtonovu teoriju gravitacije
- Ako zanemarimo gravitacijsko djelovanje (npr. ako su druge sile poput elektromagnetske puno jače) teorija se mora svoditi na specijalnu teoriju relativnosti

Einstein je došao do potpuno novog opisa koji neposredno povezuje gravitaciju sa prostor-vremenom. U tom novom opisu, koji se (pomalo nespretno) nazvao opća teorija relativnosti, prostor-vrijeme više nije statično već *dinamičko*. Gravitacija nije neko polje koje samo ispunjava prostor-vrijeme (kao što su električno ili magnetsko polje), već se očituje kao *zakrivljenje* prostor-vremena. Sva tijela (uključujući i svjetlost) se gibaju po najravnijim putanjama, no te putanje nisu više pravci zato što je prostor-vrijeme zakrivljeno. Što ga zakrivljuje? Naravno, to mora biti nešto što uzrokuje gravitacijsku silu, a znamo iz Newtonove teorije da je to masa. No, specijalna teorija relativnosti govori da je masa samo jedan oblik energije. Konačni zaključak je da sva energija koja je sadržana u nekom dijelu prostora zakrivljuje prostor-vrijeme oko sebe, i to razmjerno svom iznosu (veća gustoća energije dovodi do većeg zakrivljenja).

Gornja objašnjenja vjerojatno djeluju apstraktno i vjerojatno nerazumljivo. Potpuno objašnjenje opće teorije relativnosti zahtjeva upotrebu napredne matematike (zване diferencijalna geometrija) koja se izučava tek na 4. godini studija fizike. Također problem predstavlja i vizualizacija četverodimenzionalnih prostora. No, nekoliko slikovitih primjera u dvije dimenzije može dati osjećaj za zakrivljene prostore. Ravan prostor je onaj u kojem vrijedi Euklidska geometrija (npr. Pitagorin poučak), a primjeri su ravna površina stola ili papira. Primjer zakrivljenog prostora je sfera (tj. površina lopte). Što su najravnije krivulje na sferi? To su velike kružnice koje dijele sferu na pola



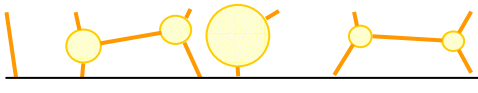
(to su kružnice najvećeg polumjera koje možemo nacrtati na sferi, a što kružnica ima veći polumjer to je manje zakrivljena, tj. ravnija).

Slikoviti prikaz kako materija zakrivljuje prostor je slijedeći. Zamislite da stojite pored kreveta koji ima ravni madrac preko kojeg je dobro zategnuta plahta. Ako uzmete dovoljno laganu kuglicu (tako da ne propada u plahtu) i samo je stavite na plahtu ona će mirovati (osim ako madrac nije nagnut, u kojem slučaju ga treba postaviti u vodoravni položaj). Ako ju zakotrljate po površini kreveta, vidjet ćete da će se ona gibati po pravcu (zbog trenja će usporavati i na koncu stati, ali zanemarimo to ovdje). To odgovara slučaju kad na tijelo ne djeluju vanjske sile. Zamislite sada da na krevet stavite neko teško tijelo (recimo sjednete na njega) koje će udubiti madrac i učiniti plahtu neravnom. Ako sad stavite kuglicu dovoljno blizu središta udubljenja, vidjet ćete da će se skotrljati prema njemu. Što ju stavite bliže središtu, brže će se skotrljati u njega. Ako kuglici date neku početnu brzinu koja nije u smjeru udubljenja, ona će se gibati po zakrivljenoj putanji. Ova situacija slikovito prikazuje zakrivljenje prostora (plahta) od strane neke materije (ono što je udubilo plahtu), koje dovodi da se tijela (kuglica) više ne gibaju po pravcima ili miruju već se gibaju po zakrivljenim putanjama. Ne postoji nikakva sila na daljinu ili neko dodatno polje – materija djeluje na tijela jedino tako što zakrivljuje prostor oko sebe.

Astrofizika i kozmologija – svemir kao laboratorij

U općoj teoriji relativnosti prostor-vrijeme nije statična arena već nešto dinamično i uzročno-posljedično povezano sa materijom sa kojom čini jednu cjelinu. Promjene u stanju materije u svemiru nužno dovode do promjene u strukturi prostor-vremena, i obrnuto. To je dovelo do potpuno novih spoznaja o Svemiru, potvrđenih eksperimentalno, od kojih ćemo ovdje spomenuti samo neke najspektakularnije.

- **Big Bang** – opisujući rezultate astrofizičkih promatranja, opća teorija relativnosti udružena sa standardnim modelom fizike elementarnih čestica (zasnovan pak na specijalnoj teoriji relativnosti) daje opis razvoja našeg Svemira. U tom opisu Svemir je prije otprilike 10 milijardi godina bio vrlo malen i ispunjen izuzetno vrućom i gustom juhom sastavljenom od elementarnih čestica. Kako se Svemir (odnosno prostor-vrijeme) širio, tako se i hladio. To je omogućilo stvaranje prvih atoma (vodika i helija), te puno kasnije prvih zvijezda, galaksija itd.
- **Crne rupe** – kada dovoljno velika zvijezda potroši svoje nuklearno gorivo, dolazi do nestabilnosti koja dovodi do eksplozije (supernova). Ukoliko nakon eksplozije zvijezda ostane dovoljno masivna, opća teorija relativnosti kaže da gravitacijsko privlačenje na koncu nadjača sve ostale sile i cijela zvijezda kolapsira u centar. Oko centra nastane sfera (horizont događaja) koja omeđuje prostor iz kojeg ništa ne može izaći, čak ni svjetlost, i koji se stoga naziva crna rupa. Što god jednom prođe horizont događaja, više ne može izaći. Astrofizičari su u zadnjih 15-tak godina uočili nekoliko kandidata za crne rupe (od kojih su neke gigantske u središtima galaksija).



Interes za proučavanje Svemira je doveo do velikog razvoja i ulaganja u astrofiziku. Kao posljedica, tehnike mjerenja su postale toliko precizne da se ti rezultati mogu koristiti za spoznaje o strukturi materije na fundamentalnom nivou, odnosno za testiranje standardnog modela elementarnih čestica. To je posebno važno jer je izgradnja novih laboratorija neophodnih za proučavanja sudara čestica na dovoljno visokim energijama postala toliko skupa da je čak i superbogata zemlja poput SAD-a odustala od daljnje gradnje. To pak znači da će Svemir sve više postajati vodeći laboratorij i za proučavanje međudjelovanja na najmanjim udaljenostima.

21. st. - crvotočine, vremeplovi, strune, 11 ili više dimenzija, ...?

Usprkos velikom razvoju fizike u 20. stoljeću, u kojem je fundamentalnu ulogu odigrala teorija relativnosti, naše razumijevanje stvarne strukture prostora i vremena je daleko od potpunog. Navedimo neka od zanimljivijih otvorenih pitanja:

- **Putovanje kroz vrijeme?** – opća teorija relativnosti, onako kako ju danas razumijemo, ostavlja otvorenim mogućnost putovanja kroz vrijeme, pa i postojanje vremeplova. Takva mogućnost otvara mnoga pitanja, pa i ona filozofska i bizarna, npr. što kad bi se vratili natrag u vremenu i ubili sebe kao bebu? Zbog tog i sličnih argumenata većina fizičara smatra da postoji neki razlog ili mehanizam koji to zabranjuje, no nitko ga nije još pronašao. Jednostavno odbacivanje takvih rješenja samo zato jer nam se ne sviđaju može biti krivo – to se dogodilo u slučaju crnih rupa za koje je dugo vremena većina fizičara smatrala da su besmislica.
- **Kvantna gravitacija?** – kao što je već rečeno, postoji velika razlika u opisu gravitacije (opće teorije relativnosti) i ostalih međudjelovanja. Između ostalog, ostala međudjelovanja (poput elektromagnetskog) se na malim udaljenostima opisuju kvantnom fizikom, dok je opća teorija relativnosti klasična teorija. Pošto Einsteinova jednažba povezuje jedne sa drugima, za pretpostaviti je da i gravitacija posjeduje kvantna svojstva na dovoljno malim udaljenostima. No, gravitacija govori o prostor-vremenu. Što bi moglo biti kvantno prostor-vrijeme? To pitanje je već desetljećima u središtu zanimanja teorijskih fizičara i zasad postoje samo (prilično spekulativne) teorije. Matematički smisljena teorija koja ima potencijal da objedini sve sile je *teorija superstruna*. Po njoj elementarni objekti nisu (točkaste) čestice već (jednodimenzionalne) strune koje žive u 10 ili možda 11 dimenzionalnom prostor-vremenu. To naravno odmah provocira brojna pitanja (npr. gdje je preostalih 6, odnosno 7 dimenzija i zašto ih ne vidimo?).

Očito je da nam treba još puno griza za razumijevanje strukture prostor-vremena, odnosno gravitacije. No, zato je to pravi izazov za nove generacije jer fizika vapi za potpuno novim idejama. Tko je spreman prihvatiti rukavicu?

