



## Einstein i relativnost

Vladimir Paar<sup>1</sup>, Zagreb

*Einstein – najbolji fizičar među violinistima*

*Albert Einstein je zacijelo najveća javna ličnost među fizičarima svih vremena. Dovoljno je prisjetiti se mnoštva poznatih i manje poznatih anegdota koje ga prate.*

*Anekdota 1.* Tijekom vožnje u vlaku konduktar je tražio voznu kartu od putnika utonulog u misli. Ovaj ju je nervozno tražio po džepovima i postajao sve nervozniji. Konduktar mu tada kaže: “Ali profesore Einstein, ja znam tko ste Vi i jasno mi je da ne želite prevariti i da ste kupili voznu kartu. Nemojte se zato uzrujavati, priznat ću Vam kao da imate kartu.” Einstein mu odgovori: “Ali gospodine, ne uzrujavam se zato jer bih se Vas bojao, nego zato jer na karti piše kuda putujem a sada pojma nemam gdje trebam sići s vlaka.”

*Anekdota 2.* Šeće jednog dana zamišljeni Einstein livadom, dođe do rječice i počne je prelaziti preko uskog brvna, ne videći da je istodobno s druge strane brvnom prema njemu krenuo jedan debeli čovjek. Na sredini brvna susretnu se s debelim gospodinom, koji pohvalivši se da je mesar, kaže: “Ja se ne mičem glupljemu od sebe.” Einstein se bez riječi okrene i vrati natrag na obalu s koje je krenuo, i kada je debeli gospodin prolazio pored njega, više za sebe Einstein kaže: “A ja da.”

*Anekdota 3.* Pozove jednom belgijska kraljica u privatnu posjetu Einsteina koji je tada boravio u Belgiji. Kraljičin vozač čekao je na željezničkoj stanici vlak kojim je trebao stići prof. Einstein. No kada je vlak stigao, izašao je samo jedan putnik, nehajno odjeven i s violinom u ruci. Nitko nije došao tko bi izgledao kao ugledni profesor te se vozač vratio u dvor i izvijestio kraljicu da Einsteina nema. Pola sata kasnije na vrata dvora stigao je violinist nehajnog izgleda. Bio je to Einstein, neobično ponosan na svoje violinističko umijeće, koji je došao kraljici uvjeren da ona želi da joj svira.

*Anekdota 4.* Einstein je godinama sudjelovao u intenzivnoj političkoj kampanji za osnivanje države Izrael, idući u SAD od mjesta do mjesta, držeći plamteće političke govore, a kad mu je nakon osnivanja države Izrael ponuđeno da bude prvi predsjednik za to nije imao nikakvog interesa.

*Anekdota 5.* Bio je i veliki borac za ljudska prava, ulagao u to mnogo vremena i truda. Kad ga je na Kaiser-Wilhelm institutu u Berlinu jedan student prava, koji je studirao u Parizu a bio je to sin Stjepana Radića, zamolio za razgovor, Einstein je spremno pristao i u detalje se zanimao za nepovoljan položaj hrvatskih intelektualaca u tadašnjoj

<sup>1</sup> Autor je Akademik Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, redoviti profesor teorijske fizike na Fizičkom odsjeku, Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, <http://mahazu.hazu.hr/~paar/>

Jugoslaviji. Razgovor je trajao gotovo cijeli dan. Nakon toga Einstein je napisao oštar protest protiv politički motiviranog ubojstva dra. M. Šufflaya u Zagrebu i uputio ga Ligi naroda u New Yorku. Protest je potpisao i njegov kolega, slavni književnik Heinrich Mann. Tekst tog pisma spada među najveće komplimente ikad upućene Hrvatskoj.

*A sada o relativnosti.* Nakon što je diplomirao fiziku kao *ne baš dobar* student, Einstein se najprije izdržavao dajući poduke a zatim se uspio zaposliti kao “tehnički ekspert 3. klase” u Švicarskom patentnom uredu. To je bio lagodni posao, koji mu je ostavljao mnogo slobodnog vremena, no praktički izoliranog iz znanstvene sredine. Tada dolazi *fascinantna* 1905. godina kada dvadesetšestogodišnji Einstein u vrlo kratkim vremenskim razmacima šalje četiri svoja znanstvena rada za objavljivanje u ugledni znanstveni časopis *Annalen der Physik*. Jedan rad se odnosio na teoriju Brownovog gibanja što je dalo potvrdu molekularnokinetičke teorije plinova, drugi rad *O elektrodinamici tijela u gibanju* odnosio se na temelje specijalne teorije relativnosti, treći na vezu između teorije relativnosti i ekvivalenciju mase i energije, te četvrti na teoriju fotoelektričnog efekta pomoću pojma fotona, najmanje “porcije” elektromagnetne energije.

Čitajući temeljni Einsteinov rad o teoriji relativnosti stječe se dojam da je Einstein sam stvorio teoriju relativnosti 1905. godine, jer u toj publikaciji on ne citira niti jedan raniji znanstveni rad iz te problematike. Utoliko je neobičnije da se formule za transformaciju koordinata između dvaju koordinatnih sustava koji se jedan u odnosu na drugog gibaju jednoliko po pravcu, a koje izražavaju fizikalno najvažniji rezultat toga rada, nazivaju Lorentzove transformacije. Ovdje se sučeljavamo na poznati znanstvenopovijesni princip da nijedan znanstvenik ne stvara sam nove revolucionarne znanstvene ideje. Situacija se može usporediti sa slučajem Galileija jer je tek u novije vrijeme došlo do razotkrivanja rezultata srednjovjekovne fizike koje je Galilei prikazivao bez citiranja izvora.

Zato se javljaju mišljenja prema kojima je dvojbeno je li Einstein uopće dao bitni doprinos teoriji relativnosti. U svojem osvrtu Whittaker piše još 1955. godine: “. . . najesen iste godine 1905. u istom svesku časopisa *Annalen der Physik*, u kojemu je objavljen njegov članak o Brownovom gibanju, objavio je Einstein i članak u kojemu je pikazao Poincareovu i Lorentzovu teoriju relativnosti, s nekoliko nadopuna.” No taj je članak izazvao veliku pažnju.

Kao osnova za objektivno vrednovanje može se uzeti slavna monografija o teoriji relativnosti, koju je 1921. godine objavio tada dvadesetgodišnji Pauli na zahtjev svog profesora Sommerfelda. U toj knjizi Pauli prikazuje povijesne podatke o radovima koji su doveli do stvaranja teorije relativnosti, od temeljnih eksperimentalnih i teorijskih radova do relevantnih filozofskih istraživanja. Danas je teško ocijeniti jesu li konačnom formuliranju teorije relativnosti veću ulogu imali ključni eksperimenti ili filozofska razmatranja. U svojim poznijim godinama Einstein je tvrdio da se oslanjao na filozofske argumente a ne na eksperimentalne rezultate.

Ponajprije treba vidjeti kakve su bile relevantne zdravorazumske predodžbe fizičara kao okvir opisa fizikalne realnosti krajem 19. stoljeća. Fizičari su tada vjerovali da postoji apsolutni prostor i apsolutno vrijeme, kao što ih je formulirao i koristio Newton, preuzevši ih od ranijih fizičara i filozofa. Sukladno tome, fizičari su vjerovali da postoji tzv. eter koji ispunjava čitav svemir i predstavlja sredstvo za širenje elektromagnetnih valova. Istodobno, taj eter predstavljao bi utjelovljenje apsolutnog prostora. Označimo li sa  $S_0$  neki određeni koordinatni sustav u kojem eter miruje, tada bi on predstavljao apsolutni prostor. Opis fizikalnih zbivanja u takvom sustavu mogao bi se smatrati “apsolutnim”. Brzine mjerene u tom sustavu predstavljale bi apsolutne brzine. Vremenska skala za sve procese bila bi određena proteklim apsolutnim vremenom: za svaku točku u apsolutnom prostoru, apsolutno vrijeme bi bilo jednako. Isto bi vrijedilo i za vrijeme mjereno u

sustavu koji se giba jednoliko po pravcu u odnosu na apsolutni sustav. U okviru takvog teorijskog kocepta fizičari su nastojali istražiti međudjelovanje tog hipotetskog etera s tijelima koja se u njemu gibaju. U toj teoriji tijela se gibaju u eteru koji apsolutno miruje i zakoni gibanja i međudjelovanja trebali bi biti opisani kao funkcija apsolutnog vremena. No taj teorijski okvir otvara niz pitanja na koja bi trebali odgovoriti pokusi.

Još je Maxwell ukazao da treba eksperimentalno odrediti apsolutno gibanje Zemlje u svemiru, a ne samo njezino gibanje relativno prema Suncu. Taj eksperiment trebalo bi izvesti analogno kao kad se mjeri brzina broda, pri čemu se mjeri brzina zvuka u smjeru gibanja broda i okomito na taj smjer. Takav pokus izveo je pomoću svjetlosnog snopa Michelson 1881. godine te ponovno, zajedno s Morleyem 1887. godine. Pritom je Zemlja poput broda koji se giba u moru etera. Taj je pokus dao neočekivan rezultat: pokazao je da je brzina svjetlosti konstantna, tj. da ne ovisi o kutu između smjera širenja svjetlosti i smjera gibanja Zemlje. To bi značilo, na primjer, da svjetlost izvora koji se giba prema nama ima istu brzinu kao svjetlost izvora koji se od nas udaljava. Većina fizičara s nevjericom su gledali na taj rezultat i zato je niz drugih fizičara ponovilo pokus, s još većom preciznošću. No svi su dobili isti rezultat kao Michelson i Morley: brzina svjetlosti mjerena u smjeru gibanja Zemlje, ili u smjeru suprotnom gibanju Zemlje, ili okomito na taj smjer, uvijek je jednaka.

Fizičari su odmah dali jednostavno objašnjenje u okviru teorije etera i to tako da Zemlja u svom gibanju povlači za sobom i okolni eter, pa je gibanje svjetlosti na površini Zemlje takvo kao da eter miruje u odnosu na Zemljinu površinu pa je brzina svjetlosti u svakom smjeru jednaka.

No takvo povlačenje okolnog etera pri gibanju Zemlje bilo je u suprotnosti s eksperimentom aberacije svjetlosti, poznatim još od 1728. godine. Naime, da bi se svjetlost koja dolazi s neke zvijezde mogla promatrati, mora se smjer osi teleskopa mijenjati u ovisnosti o smjeru kretanja Zemlje prema upadnom smjeru svjetlosti s te zvijezde. A da bi se to objasnilo pomoću teorije etera, Zemlja se mora gibati kroz mirni eter, bez da ga povlači za sobom. Dakle, jedan pokus pokazuje da Zemlja pri svom gibanju sa sobom povlači eter, a drugi da ga uopće ne povlači nego da se giba u odnosu na okolni mirni eter.

Iz tih i drugih eksperimenata bilo je očito da teorija etera nije u skladu s pokusima, nego da zakazuje. Dakle, nema etera, pa niti apsolutnog sustava.

Tada je Voigt 1887. godine teorijski istražio pitanje kakva bi morala biti veza između koordinata jednog mirujućeg i drugog gibajućeg koordinatnog sustava da bi brzina svjetlosti u oba sustava imala jednaku vrijednost. Pritom je Voigt napustio pojam apsolutnog vremena te transformirao vremensku koordinatu iz jednog koordinatnog sustava u drugi. Voigt je postavio sljedeće pitanje: kakva bi trebala biti transformacija prostornih koordinata i vremena između ta dva sustava da bi oblik diferencijalne jednadžbe za širenje svjetlosti (poznate iz Maxwellove elektrodinamike) bio jednak u oba sustava, što znači da bi i brzina svjetlosti bila jednaka u oba sustava. Tako je dobio vezu među prostornim koordinatama i vremena:

$$\begin{aligned}x' &= x - vy \\y' &= y\sqrt{1 - \beta^2} \\z' &= z\sqrt{1 - \beta^2} \\t' &= t - \frac{v}{c^2}x\end{aligned}\quad \text{Voigtove transformacije}$$

$x$ ,  $y$  i  $z$  su koordinate u jednom koordinatnom sustavu  $S$ , a  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  u drugom sustavu  $S'$ , koji se prema  $S$  giba brzinom  $v$  paralelno osi  $x$ . Veličina  $\beta$  je definirana kvocijentom  $\beta = \frac{v}{c}$ , gdje je  $c$  brzina svjetlosti.

Množenjem desne strane Voigtove transformacije s  $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  dobije se transformacija među koordinatama koja isto tako čuva brzinu svjetlosti:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Lorentzove transformacije

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Ta se transformacija prostornih koordinata i vremena zove Lorentzova transformacija. U Voigtovoj transformaciji po prvi put u povijesti napušten je pojam apsolutnog vremena za koje bi vrijedilo

$$t' = t,$$

nego vrijeme ovisi o gibanju sustava i o prostoru. Tek uz tu pretpostavku dobiva se jednaka brzina svjetlosti u oba sustava. No fizičari su i dalje smatrali da vrijeme  $t$  koje se mjeri u apsolutnom sustavu  $S_0$  u kojem eter miruje, predstavlja apsolutno vrijeme koje je jedino fizikalno realno, dok je transformirano vrijeme  $t'$  "računalna veličina" ili "lokalno mjesno vrijeme" koje se iz različitih razloga razlikuje od stvarnog apsolutnog vremena. Voigtov rezultat nije izazvao nikakav interes među fizičarima.

Godine 1892. su Lorentz i Fitzgerald, neovisno jedan o drugom, objasnili negativni rezultat Michelsona i Morleya tako da su uveli hipotezu tzv. Lorentz-Fitzgerald kontrakcije: pretpostavili su da se sve dužine u smjeru gibanja skraćuju za faktor  $\sqrt{1-\beta^2}$ . No to su skraćivanje tumačili kao posljedicu međudjelovanja s eterom. Godine 1899. došao je Lorentz do ispravne transformacije prostornih koordinata. Također je zaključio da treba transformirati i vrijeme, ali tada još nije naveo kako.

Godine 1904. uveo je francuski fizičar Poincaré osnovne ideje teorije relativnosti: *"Nijedno tijelo ne može se gibati brzinom većom od brzine svjetlosti, jer što im se brzina povećava, to je veća njihova tromost i teži prema beskonačnosti kad se brzina približava brzini svjetlosti."* *"Promatramo dva promatrača u raznim koordinatnim sustavima koji se jedan u odnosu na drugi jednoliko gibaju. . . Kada sinkroniziramo satove, oni ne pokazuju stvarno vrijeme, nego lokalno vrijeme. . . No prema principu relativnosti nema metode da se utvrdi je li sustav u mirovanju ili u gibanju. . ."* *"Prirodni zakoni moraju biti identični za motritelja koji miruje i za motritelja koji se prema njemu giba jednoliko, budući da ne postoji metoda koja bi omogućila da se utvrdi nalazi li se motritelj u stanju takvog gibanja ili ne."* Poincaré po prvi put uvodi princip relativnosti i sinkronizaciju satova u raznim sustavima, što godinu dana kasnije u svom radu koristi Einstein. Međutim, Poincaré još uvijek nije odbacio koncept apsolutnog prostora. Doduše on kaže da nema načina za utvrđivanje apsolutnog gibanja, ali nema hrabrosti da iz toga zaključuje da apsolutni sustav ne postoji.

No fizičar i filozof Ernst Mach još 1883. promatra problem prostora i vremena s filozofskog stajališta. Slijedeći ranije Leibnizove kritike Newtonovog apsolutnog prostora, Mach tvrdi da su i apsolutni prostor i apsolutno vrijeme metafizičke spekulacije.

Upravo taj Machov filozofski stav izvršio je ključni utjecaj na mladog Einsteina, sugerirajući mu da apsolutni prostor i apsolutno vrijeme nisu fizikalni.

Lorentz je u svom radu iz 1904. godine izveo transformacije prostornih koordinata i vremena između dva koordinatna sustava koji se jedan u odnosu na drugi jednoliko gibaju postavivši zahtjev relativnosti: da temeljne jednadžbe elektrodinamike moraju u

svim takvim sustavima imati jednaki oblik. Na taj način došao je do jednadžbi koje se danas zovu Lorentzove transformacije, pomoću kojih se prostorne koordinate i vrijeme transformiraju između dva sustava. To su upravo jednadžbe koje jednostavno proizlaze iz Voigtovih transformacija. To su ključne jednadžbe teorije relativnosti, koje je kasnije koristio Einstein. Međutim, Lorentz je i dalje vjerovao u apsolutni prostor i apsolutno vrijeme, a "lokalno" vrijeme je smatrao veličinom bez dubljeg fizikalnog značenja.

Poincaré je iste 1904. godine razotkrio matematičku strukturu Lorentzovih transformacija kao matematičke grupe s bazičnom nepromjenjivom veličinom (relativističkom invarijantom)

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2,$$

u četverodimenzionalnom prostoru s koordinatama  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $ict$ , gdje je  $i = \sqrt{-1}$  (imaginarna jedinica), predstavlja grupu. Ta se matematička grupa danas zove Lorentzova grupa. Ovim Poincaréovim radom izgrađena je matematička struktura teorije relativnosti.

A što je onda bitno novo u teoriji relativnosti dao Einstein 1905. godine? On je došao do istih rezultata kao ranije Lorentz i Poincaré. Sam Einstein je kasnije napisao da za njih nije znao. Einstein se nije pozivao ni na eksperiment Michelsona i Morleya nego na filozofske argumente Macha. S te pozicije u teoriji relativnosti je prvi odbacio apsolutni prostor i apsolutno vrijeme, pa više nije trebalo ni etera. Sukladno tome on je, za razliku od Lorentza i Poincaréa, relativnost vremena i prostora smatrao fizikalnom realnošću. To je njegov glavni doprinos. Nadalje, Lorentzovu grupu je izveo na općenitiji način nego njegovi prethodnici.

Što se pak tiče slavne formule o vezi mase i energije, još 1900. Poincaré je objavio da veličina  $\frac{E}{c^2}$  u elektromagnetizmu predstavlja masu, tj. da vrijedi  $E = mc^2$ . Čak i sam Einstein u svom radu iz 1905. godine citira to Poincaréovo otkriće. Einstein je toj formuli dao šire značenje.

U pomalo sarkastičnom komentaru 1911. godine Poincaré piše o Einsteinu: "Einstein je jedna od najoriginalnijih osoba koje sam ikad upoznao... Što kod njega najviše zadivljuje jest lakoća s kojom može prisvajati nove ideje i sve njihove posljedice iznijeti na vidjelo."

Vjerojatno zato Einstein nije mogao dobiti Nobelovu nagradu za teoriju relativnosti, ali ju je dobio za drugo svoje veliko teorijsko otkriće, kad je pomoću hipoteze fotona objasnio fotoelektrični efekt i time značajno pridonio početnom razvoju kvantne fizike.

Kasnije je Einstein došao do još dva velika znanstvena otkrića opće teorije relativnosti u koju je uključio gravitaciju i bozonski karakter fotona što predstavlja temelj za funkcioniranje lasera.

Nakon 1920. godine Einstein je načeo problem sjedinjavanja elektromagnetizma i gravitacije, ali taj problem nikad nije riješio do kraja.

\*\*\*

*Čista matematika je, na svoj način, poezija ideja logike.*

*Albert Einstein*