

TEORIJA RELATIVNOSTI

Članci o teoriji relativnosti namijenjeni široj čitalačkoj publici često započinju pričom o Albertu Einsteinu, njegovom životu, idejama, misaonim eksperimentima vezanim uz putovanje brzinom svjetlosti, zahvaljujući kojima je došao do svojih epohalnih znanstvenih rezultata. Međutim, da bi se podrobnije objasnili smisao i sadržaj ove fizikalne teorije, potrebno je zaći malo dublje u povijest znanosti, s obzirom da je ta teorija nastala prvenstveno zbog potrebe za revizijom nekih, do tada u mehanici široko prihvaćenih, principa i koncepcija, koji su bili dovedeni u pitanje zbog svoga proturječja s eksperimentalnim, ali i teorijskim, rezultatima ostvarenim krajem XIX stoljeća na drugim područjima fizike.

Nije zato naodmet u ovom našem pokušaju "popularizacije" teorije relativnosti, krenuti od početka, od velikog talijanskog učenjaka Galilea Galileia (1564-1642), koji se smatra utemeljiteljem fizike, onakve kakvu je poznajemo danas. Premda je Galilei došao do izuzetno značajnih rezultata i na području optike i astronomije, a bavio se i naukom o toplini, najznačajnijim se smatra njegov rad kojim je utvrdio osnovne zakone gibanja tijela na površini Zemlje, na osnovi njih izveo zaključke što su poslužili kao temelj klasične mehanike, koju je nešto kasnije izgradio engleski matematičar i fizičar Isaac Newton. Jedan od bitnih fizikalnih principa koji je Galilei naslutio u svom istraživanju predstavlja tzv. "Galilejev princip relativnosti" koji tvrdi da su zakoni fizike isti za sve promatrače koji se jednoliko gibaju jedan u odnosu na drugoga. Taj princip nije teško shvatiti - zamislimo jednog promatrača koji stoji u vlaku koji se giba po savršeno ravnim i savršeno izglacanim tračnicama jednolikom brzinom i drugog koji stoji pokraj pruge po kojoj se vlak giba. Stvari se oko jednog i drugog promatrača odvijaju identično - recimo lopta koju ispusti onaj u vlaku gibat će se jednoliko ubrzano po okomici na pod vagona (koji je po pretpostavci paralelan površini Zemlje) s ubrzanjem $g=9.81\text{m/s}^2$,¹ jednako kao i lopta koju je ispustio promatrač koji stoji pokraj pruge. Svi zakoni fizike koje uočavaju jedan i drugi promatrač vrijede jednako. U stvari, kad vagon ne bi imao prozora, putnik u njemu ne bi mogao znati da li se njegov vagon giba ili miruje (dakako, ponavljamo, radi se o savršeno jednolikom i pravocrtном gibanju, premda je svatko tko se češće vozio vlakom najvjerojatnije iskusio osjećaj da ne može odrediti da li se vagon u kojemu se nalazi kreće ili miruje).

Galilejev princip relativnosti zapravo kaže da ne postoji način odredimo što se kreće, a što miruje na neki "apsolutan" način. Na prvi pogled ova se tvrdnja kosi s našim iskustvom, jer svatko od nas nema nikakvih dvojbi pri prosudbi o tome giba li se nešto što zapaža u svojoj blizini ili ne. No to je, kako smo rekli, tako samo na prvi pogled, jer kad u običnom govoru kažemo da nešto miruje, odnosno da se giba, to znači da miruje tj. da se giba u odnosu na površinu Zemlje. No, kao što znamo, i Zemlja se giba oko Sunca i Sunce se giba u našoj Galaksiji i sama se naša Galaksija giba, itd. Dakle, gibanje možemo smatrati relativnim, a stanje apsolutnog mirovanja očito je nešto što ne možemo utvrditi samo tako (ako se to uopće i može utvrditi i ako to ima nekog smisla).

Primijetimo još jednu stvar vezanu uz navedeni primjer s vlakom koji se giba savršeno jednoliko i pravocrtно. Zamislimo da se promatrač koji se vozi u vlaku počne gibati jednolikom brzinom u smjeru gibanja vlaka (recimo da hoda duž hodnika vagona). Kolikom će se brzinom gibati u odnosu na promarača koji stoji pored pruge? Vjerojatno će se svatko razuman složiti sa slijedećim odgovorom - giba se brzinom koja je jednaka zbroju brzine vlaka i brzine njegovog vlastitog gibanja u vlaku (tj. u vagonu kojim putuje). Ako bi se gibao u smjeru suprotnom gibanju vlaka radilo bi se o razlici ovih brzina. Takav odgovor je posve logičan - brzine bi se očito trebale "slagati" jedna na drugu. No da li je točan? Odgovor na ovo pitanje proizašao je iz eksperimentalnih rezultata vezanih uz mjerenje brzine svjetlosti, odnosno na osnovi proučavanja fenomena elektromagnetizma.

Teorija o elektromagnetizmu tj. elektricitetu i magnetizmu razvijala se usporedo s razvojem klasične mehanike. Zapravo, pojave elektriciteta i magnetizma najprije su bile tretirane odvojeno, da bi kasnija proučavanja, posebice Oerstedov pokus i kasnije Faradayevo otkriće elektromagnetske indukcije, doveli do njihovog "ujedinjenja". Vrhunac tih napora predstavljao je rad škotskog fizičara Jamesa C. Maxwella koji je u svojoj raspravi pod nazivom "A Treatise of Electricity and Magnetism" iz 1873. dao potpun formalni (matematički) okvir za opis elektromagnetskih pojava - radi se o sustavu od četiri diferencijalne jednačbe za električno i magnetsko polje koje su po njemu nazvane Maxwellovim.²

1 Gravitacijsko ubrzanje koje uzrokuje Zemlja na svojoj površini (inače ono varira između 9.83 m/s^2 na polovima i 9.78 m/s^2 na ekvatoru, pa se uzima neka srednja vrijednost).

2 Primjedba o "inkompatibilnosti" Maxwelllove teorije i Newtonove klasične mehanike može se naći u **Dodatku**.

Trijumf Maxwellove teorije predstavljalo je teorijsko predviđanje da je svjetlost elektromagnetske prirode - rješenje Maxwellovih jednadžbi u vakuumu predstavlja val (sinusoidalna funkcija) koji putuje brzinom svjetlosti, pri čemu se dobiva ovisnost te brzine o konstantama vezanim uz električne i magnetske pojave - permitivnosti ϵ_0 i permeabilnosti μ_0 vakuuma, koja je potvrđena mjerenjem njihovih vrijednosti -

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} .$$
 Tako je dakle utvrđeno da je svjetlost elektromagnetski val veoma male valne duljine

(između 390 i 750 nanometara). Kasniji eksperimenti njemačkog fizičara H. Hertza, koji je krajem XIX stoljeća, uspio proizvesti elektromagnetske valove (velikih valnih duljina) u svom laboratoriju, predstavljali su definitivnu potvrdu ispravnosti Maxwellove teorije.

No, ovdje se sada postavlja pitanje o mediju u kojem se odvija širenje elektromagnetskog vala, odnosno titranje električnog i magnetskog polja koja taj val "reprezentiraju". Zapravo, analogno se pitanje postavilo već i puno prije nastanka Maxwellove teorije, još početkom XIX stoljeća, kad je na osnovi optičkih eksperimenata utvrđeno da je svjetlost valne prirode, a ne korpuskularne, kako je to tvrdio Newton. Da bi se na njega odgovorilo, bila je postavljena hipoteza o "eteru" - supstanciji bez težine koja prožima sav prostor, a služi kao medij za širenje elektromagnetskih "pobuđenja". Pretpostavljalo se da se ta supstancija nalazi u stanju apsolutnog mirovanja, što bi značilo da je je takvo mirovanje smislen pojam i da možemo govoriti o apsolutnoj brzini gibanja tijela. No u tom slučaju Galilejev princip relativnosti ne bi vrijedio - promatrač koji se giba u odnosu na eter izmjerio bi da je iznos brzine svjetlosti u smjeru njegovog gibanja manji, a u smjeru suprotnom od njegovog gibanja veći od iznosa koji bi izmjerio promatrač koji u odnosu na eter miruje, pa prema tome zakoni fizike za promatrače koji se gibaju jedan u odnosu na drugog konstantnim brzinama ne bi bili posve isti. Hipoteza o eteru bila je provjerena poznatim eksperimentom Michelsona i Morleya iz 1887. koji su pomoću vrlo preciznog instrumenta pokušali izmjeriti razliku u brzini svjetlosti u smjeru gibanja Zemlje oko Sunca i brzine svjetlosti u suprotnom smjeru. Međutim, ta se razlika nije mogla utvrditi - ispalo je da je brzina svjetlosti u oba smjera jednaka. Kasnije je eksperimentalno odbačena i mogućnost za Zemlja "svoj" eter nosi sa sobom, za koju se pretpostavljalo da bi možda mogla objasniti ovakav rezultat. Uglavnom, svi eksperimentalni rezultati s kraja XIX stoljeća ukazivali su da za hipotezu o eteru nema nikakih dokaza, tako da je ona na kraju bila odbačena.

Neuspjeh pojma etera imao je vrlo važne posljedice na naše shvaćanje prirode. Primjerice na taj se način došlo do zaključka da se širenje svjetlosti, odnosno elektromagnetskih valova ne može objasniti na osnovi mehaničkih principa, već da se radi o pojavi sasvim drugačije prirode od recimo širenja valova na vodi ili širenja zvuka u zraku, što je kasnije dovelo pretpostavke o dualizmu val-čestica u kvantnoj fizici, odnosno do koncepta polja koje opisuje sve materijalne čestice, tj. materiju uopće³. Treba reći da je to imalo mnoge implikacije i na našu teoriju spoznaje, jer se tako pokazalo da "logika prirode" daleko nadmašuju naše iskustvene predodžbe. Ovaj neuspjeh je predstavljao i konačan udarac koncepciji o apsolutom mirovanju, odnosno gibanju.

Primjetimo ovdje da ona naša pretpostavka o "slaganju" brzina sada ne vrijedi, barem ne za svjetlost - brzina kojom putuje valna fronta svjetlosti čiji se izvor recimo giba u vlaku, nije, mjereno od strane promatrača koji stoji kraj pruge, jednaka zbroju brzine svjetlosti mjerene iz vagona i brzine gibanja vlaka, već je jednaka brzini svjetlosti mjerenoj iz vagona, a pokazuje se da ovakva pretpostavka ne vrijedi niti za druga gibanja tj. gibanja materijalnih tijela (vidi **Dodatak** na kraju teksta).

Princip konstantnosti brzine svjetlosti, neovisno o gibanju promatrača koji je mjeri (odnosno njezinog izvora), predstavljao je osnovu na kojoj je Einstein razvio svoju specijalnu teoriju relativnosti (osim specijalne, postoji i opća teorija relativnosti u kojoj se razmatraju gravitacijski utjecaji). Zapravo, da bi ova (specijalna) teorija relativnosti bila razvijena, bile su potrebne samo dvije jednostavne pretpostavke:

- 1) Galilejev princip relativnosti
- 2) Princip konstantnosti brzine svjetlosti

Specijalna teorija relativnosti izražava se u preciznoj matematičkoj formi, pa se i njezini rezultati dobivaju na osnovi egzaktnih matematičkih izvoda. No, neke od zaključaka koji ukazuju na te rezultate, a oni su kako rekospo posljedice dvaju gorespomenutih principa, možemo dobiti već i jednostavnom logičkim razmatranjem (misaonim eksperimentom). Pretpostavimo tako da promatrač u vlaku koji smo prethodno razmatrali, upali žarulju. Ako se žarulja nalazi točno na sredini vagona (zamislimo da promatrač stoji na hodniku jednog putničkog vagona) snop svjetlosti će u istom trenutku doseći i jedan i drugi njegov kraj

3 Pojam "materije" ovdje treba shvatiti u širem smislu, pa tu spada i svjetlost - pokazuje se naime da ona nije samo valne nego i čestične (korpuskularne) prirode, pa tako govorimo o fotonima kao "česticama svjetlosti". Pretpostavku o čestičnoj prirodi svjetlosti dokazao je upravo Einstein u svome radu kojim je objasnio fizikalni fenomen poznat pod nazivom "fotoelektrični efekt".

(nakon vremena $t = l/2c$, gdje je l duljina vagona, a c brzina svjetlost). Drugim riječim ovi događaji (dolazak snopa svjetlosti do jednog i drugog kraja vagona) bit će za ovog promatrača istovremeni. Međutim, što vidi promatrač koji stoji pokraj pruge (recimo ako je "stranica" vagona okrenuta prema tom promatraču prozirna)? Za tog promatrača brzina svjetlosti je ista kao i za promatrača u vagonu, pa kad se žarulja upali, valna fronta svjetlosti širi se jednakom brzinom (c) u svim smjerovima, dakle i u smjeru gibanja, odnosno u smjeru suprotnom od smjera gibanja vlaka. Međutim i vlak se giba, pa se dakle jedan kraj vagona udaljava od "svjetlosne fronte" koja putuje kroz hodnik vagona, dok mu se drugi približava. Dakle, gledano iz pozicije promatrača, koji se giba u odnosu na vagon u kojemu se odvija ovaj "eksperiment" tj. u odnosu na kojega se taj vagon giba, a to je, kako znamo, isto, svjetlost neće istovremeno dosegnuti jedan i drugi kraj vagona (no treba primijetiti da je ta razlika izuzetno mala, jer je brzina svjetlosti u odnosu na brzinu vlaka izuzetno velika). Dakle, nešto što je istovremeno za jednog promatrača, nije (u principu) istovremeno nekog drugog. Istovremenost događaja dakle, jednako kao i gibanje, nije apsolutan pojam, već ovisi o "sustavu referencije" - a to je "okolina" iz koje se promatra određeno fizikalno događanje. Ovaj je efekt samo jedna od indikacija, odnosno manifestacija, jednog općenitog fizikalnog principa koji proizlazi iz teorije relativnosti, a koji veoma proturječi našem iskustvu i zdravorazumskom osjećaju za zbivanja u svijetu oko nas, pa je kao takav, nakon što je bio objavljen, izazvao veliki publicitet u široj javnosti, kao i mnoga osporavanja - principa relativnosti vremena.

Ovaj princip kaže da vrijeme u različitim sustavima referencije teče različito. Primjerice, ako stanemo uspoređivati vremena koja pokazuje sat koji se vozi u vlaku što prolazi pokraj nas, s vremenima koja pokazuje sat na našoj ruci, ispast će da sat u vlaku ide sporije (zbog toga se govori o "dilataciji vremena"). Ovo što smo sad rekli predviđa teorija relativnosti, no proturječi našem iskustvu - takvo što nitko nikada nije uspio uočiti. Međutim, stvar je u tome što je ovaj efekt, kako se prema teoriji relativnosti može izračunati, posve zanemariv ako se radi o brzinama koje su mnogo puta manje od brzine svjetlosti, a ona, ne zaboravimo, iznosi 300.000 km/s ili 1.080.000.000 km/h (više od milijardu kilometara na sat, pa je svjetlost, dakle 10 milijuna puta brža od vlaka koji juri sa 100 kilometara na sat). Efekt dilatacije vremena postaje uočljiv tek ako je brzina gibanja sata koji uspoređujemo s onim na našoj ruci, usporediva s brzinom svjetlosti.

Premda su maksimalne brzine koje čovjek može postići još uvijek zanemarive u odnosu na onu svjetlosnu, postoje ipak eksperimentalni dokazi principa relativnosti vremena ili odnosno fenomena vremenske dilatacije. Jedan eksperimentalni dokaz predstavljaju subatomske čestice mioni (μ -leptoni) koji nastaju u sudarima kozmičkih zraka s molekulama kisika ili dušika u višim slojevima atmosfere, a koji se kreću brzinama bliskim svjetlosnoj. Vrijeme njihovog "života" (vrijeme poluraspada) iznosi oko dvije milijuntinke sekunde (raspadnu se u elektron i par neutrino-antineutrino), pa prema klasičnom proračunu oni nikako ne bi mogli (usprkos svojoj brzini) dospjeti do površine zemlje. No, naši ih eksperimentalni uređaji na Zemlji detektiraju u izobilju, što znači da žive puno duže nego što bi trebali živjeti. Ova pojava može se objasniti na osnovi relativističkog proračuna (njihov vlastiti "sat" otkucava sporije). S fenomenom vremenske dilatacije povezan je i poznati "paradoks blizanaca", prema kojemu u slučaju dvojice braće - blizanaca, od kojih jedan kreće na svemirsko putovanje brzinom bliskom brzini svjetlosti, dok drugi ostaje na Zemlji, po povratku onog prvog sa svog putovanja, njih dvojica više ne bi bili jednake starosti - onaj koji je poduzeo svemirsko putovanje bio bi mlađi od onoga koji je ostao na Zemlji i to tim više što putovao većom brzinom.⁴

Treba istaknuti da nam relativistički efekti otvaraju mogućnost da posjetimo daleke zvjezdane, pa možda i galaktičke sustave, usprkos ograničenju koje nam postavlja relativistička dinamika, naime da se ne može putovati brzinom većom od brzine svjetlosti. Poznato je da su nam i najbliže zvijezde izuzetno daleko - najbliža od njih Proxima Centauri udaljena je 4.3 svjetlosne godine što iznosi 40.681.440.000 kilometara (više od 40 bilijuna kilometara). No zahvaljujući relativističkim efektima, moguće je doseći vrlo daleke predjele za relativno malo vrijeme, ako imamo dovoljno brz svemirski brod, jer se pri velikim brzinama dolazi i do dilatacije prostora, tj. udaljenost između Zmlje od ciljnog nebeskog tijela se smanjuje. No, treba naglasiti da bi se astronauti koji su poduzeli jedno ovakvo putovanje, prema pri povratku na Zemlju našli u nekom budućem vremenu, tim daljem, što su putovali brže (sjetimo se "paradoksa blizanaca").

Kao što smo upravo spomenuli, osim efekta dilatacije vremena specijalna teorija relativnosti predviđa i efekt dilatacije prostora (smanjenje duljine tijela u smjeru njegovog gibanja), efekt povećanja mase tijela u gibanju, a postavlja i ograničenje brzine koje tijelo u principu može dostići - tu granicu predstavlja upravo

4 Paradoks blizanaca predstavlja nešto kompliciraniji slučaj od prethodno navedenog, koji se mora razmatrati u okviru opće teorije relativnosti o kojoj će biti riječi nešto kasnije. Taj je efekt potvrđen eksperimentom s dva vrlo precizna atomska sata od kojih je jedan bio stavljen u avion koji je obišao cijelu Zemaljsku kuglu, dok je drugi ostao na mjestu. Kad se taj prvi vratio, mogla se uočiti razlika u vremenima koja su oni pokazivali.

brzina svjetlosti (premda postoje hipoteze o postojanju čestica koje se gibaju i brže ne kršeći postavke ove teorije). Einstein je zapravo u okviru svoje specijalne teorije razvio jednu novu (relativističku) dinamiku, gdje osnovni pojmovi kao što su prostor, vrijeme, masa, energija, impuls tijela dobivaju novo značenje i opisuju se na nešto drugačiji način nego u klasičnoj dinamici. Prostor u specijalnoj teoriji relativnosti tako više nije uobičajeni euklidski prostor (pozitivno definitne metrike), niti je vrijeme jedna posebna, od njega neovisna dimenzija, već govorimo o četverodimenzionalnom "pseudoeuklidskom" prostor/vremenu (prostor Minkowskog). Fizikalne veličine koje su u klasičnoj dinamici vektori (veličine s tri komponente), izražavaju se relativističkim izrazima, kao četverovektori (veličine s četiri komponente), pa tako imamo četverovektor položaja tijela, četverovektor energije-impulsa i sl. Klasična dinamika koju je razvio Newton, a usavršavali fizičari tokom XVIII i XIX stoljeća, samo je aproksimacija one relativističke, koja vrijedi za brzine veoma male u odnosu na brzinu svjetlosti.

Napomenimo da se u okviru relativističke dinamike dobiva i čuvena Einsteinovu formulu za energiju tijela mase m koje miruje - $E = mc^2$. Ova formula, kao što je poznato, govori da je masu (tijela) moguće pretvoriti u energiju - što i je dokazano pri proučavanju nuklearnih reakcija, odnosno interakcija elementarnih čestica (u niskoenergetskim procesima takvi se efekti ne mogu registrirati).

Einstein je svoju specijalnu teoriju relativnosti (o kojoj je dosad bilo riječi) formulirao u svom članku pod naslovom "O elektrodinamici tijela u gibanju" koji je objavljen 1905. Dalji njegov rad bio je usredotočen na izgradnju opće teorije relativnosti, odnosno poopćenje rezultata do kojih je došao do tada. Za ostvarenje toga cilja trebalo mu je desetak godina. Opća teorija relativnosti bila je formulirana u članku "Osnove opće teorije relativnosti", objavljenom 1916. Reći ćemo nešto i o toj Einsteinovoj teoriji.

Pri izgradnji svoje specijalne teorije relativnosti Einstein se bavio, kao što smo vidjeli, razmatranjem sustava referencije koji se jedan prema drugom kreću jednolikom brzinom. U izgradnji opće teorije relativnosti svoja je razmatranja poopćio na sustave koji se jedan prema drugome gibaju ubrzano.

Prikladno je ovdje spomenuti Einsteinova poznati misaoni eksperiment, koji je predstavljao značajan poticaj za njegova otkrića na području opće relativnosti, u kojemu se promatra lift koji slobodno pada u gravitacijskom polju. Takav sustav nazivamo inercijalnim - u njemu na tijela ne djeluju nikakve sile, pa dakle vlada bestežinsko stanje, kakvo primjerice vlada u unutrašnjosti svemirskog broda koji kruži oko Zemlje. Zamislimo da promatrač u liftu pusti uzak snop svjetlosti paralelan podu lifta da prolazi kroz rupicu na jednoj od "stranica" lifta. Ovaj promatrač vidjet će pravocrtni snop, tj. valnu frontu svjetlosti koja se širi pravocrtno, prolazi kroz rupicu i izlazi van. No, što će vidjeti promatrač koji stoji na površini Zemlje i gleda padanje lifta? Vidjet će također snop svjetlosti koji prolazi kroz rupicu, no ta rupica neće biti u razini izvora iz kojeg je valna fronta (koja upravo izlazi) krenula već malo niže, jer će se lift zbog svog slobodnog pada, u vremenu potrebnom da valna fronta dosegne rupicu, malo spustiti. Dakle, svjetlost se neće gibati pravocrtno u gravitacijskom polju. Ovaj efekt proizlazi već iz Einsteinove veze između mase i energije ($E = mc^2$) - svjetlost nosi neku energiju, pa prema tome ima i masu, a na masu djeluje sila gravitacije. Možemo reći da svjetlost biva privučena gravitacijskim poljem ili, drugim riječima, da gravitacija privlači čestice svjetlosti (fotone) kao i druga tijela.

No s obzirom da zrake svjetlosti predstavljaju pravce u prostoru (svjetlost putuje najkraćim putem između dvije točke, a to upravo odgovara definiciji pravca), odavde slijedi da je utjecaj gravitacijske sile moguće opisati u terminima geometrije prostora u kojemu ona djeluje, preko veličina koje mjere njegovu "zakrivljenost".⁵ Na osnovi ove ideje, uz korištenje matematičkog aparata nastalog razvojem ideja o neeuklidskim geometrijama, koji je u doba Einsteinovih otkrića bio već dobro poznat (najzaslužnijim za ovaj razvoj može se smatrati njemački matematičar B. Riemann), Einstein je pokazao da se prostor, dakle svemir, može tretirati kao tzv. Riemannova mnogostrukost čija je metrika (geometrijska svojstva) određena njezinim "fizikalnim sadržajem" (tj. tenzorom energije-impulsa, koji sadrži informaciju o raspodjeli masa (energije) u prostoru i njihovim impulsima) - ovu vezu opisuje tzv. Einsteinova jednadžba, diferencijalna jednadžba za metriku (geometrijsku formu) prostor/vremena. Napomenimo da taj četverodimenzionalni prostor prelazi u već spomenuti prostor Minkowskog u područjima koja su veoma udaljena od masivnih tijela.

Na taj način Einstein je povezao geometriju i fiziku i razbio naše uobičajene predodžbe o prostoru i vremenu kao nezavisnim i apsolutnim (euklidskim) kategorijama koje su dane a priori. Zapravo, teorija relativnosti, specijalna i opća, izazvala je pravu revoluciju u našem poimanju svijeta i otvorila brojne nove perspektive i u fizici i u znanosti uopće.

Spomenimo ovdje samo kozmološke teorije, odnosno modele svemira poput onih Friedmannovih, koji su doveli do teorije o nastanku svemira u Velikom prasku (Big Bang), široko prihvaćene nakon što je američki astronom E. Hubble početkom tridesetih godina prošlog stoljeća ustanovio da se galaksije našeg svemira

5 Ovu mogućnost otvorio je zapravo eksperimentalni dokaz o "ekvivalentnost trome i teške mase" do kojega je došao mađarski fizičar L. Eötvös.

udaljavaju jedna od druge ili da se, drugim riječima, svemir širi. Tu je također teorija crnim jamama, objektima koji mogu toliko "zakriviti" prostor da predstavljaju "ponore" za svjetlosne zrake koje im prolaze preblizu, te uopće teorije o evoluciji zvijezda. Dakako teorija relativnosti, odnosno relativistička dinamika nezaobilazna je u svim fizikalnim teorijama u kojima se razmatraju događanja i procesi na "visokim energijama" (tj. pri kojima relativistički efekti nisu zanemarivi).

Treba reći da je opća teorija relativnosti (kao i ona specijalna) dokazana brojnim eksperimentima, od kojih je prvi bio onaj s mjerenjem odklona zraka svjetlosti s jedne daleke zvijezde pri njihovom prolazu blizu Sunca tokom njegove pomrčine, izveden 1919 godine. Uslijedili su eksperimenti s mjerenjem zakretanja Merkurovog perihela (koji, za razliku od relativističke, klasična mehanika ne predviđa), mjerenjem "crvenog pomaka" svjetlosti u gravitacijskom polju i mnogi drugi, tako da ovu teoriju danas nitko više ne dovodi u sumnju. Danas su aktualni pokušaji uklapanja Einsteinove opće teorije relativnosti, odnosno teorije gravitacijske sile, u okvire kvantne teorije polja (kvantizacija gravitacijskih polja), teorije koja opisuje fiziku mikrosvijeta, no čini se da ovi pokušaji nisu još doveli do nekih definitivnih, neupitnih rezultata.

Recimo na kraju da bismo ovu priču o općoj teoriji relativnosti, kao i o onoj specijalnoj mogli nastaviti gotovo unedogled, no to bi od čitatelja već zahtijevalo znatno veći intelektualni napor, a i poznavanje odgovarajućeg matematičkog aparata. One zainteresirane upućujemo na literaturu navedenu dolje, kao i literaturu navedenu u toj literaturi. I premda se dublje proučavanje teorije relativnosti može činiti vrlo zahtjevnim i teškim, ono se ipak isplati, jer nam otvara mnoge nove spoznajne vidike i uvodi nas u zanimljivi svijet suvremene fizike i suvremene znanosti uopće.

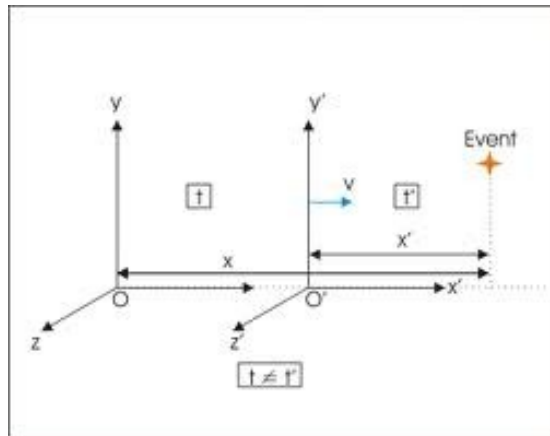
Dodatak

Fizičari bi rekli kako ovaj rezultat - prema kojemu princip "slaganja brzina" ne vrijedi - manifestira "neinvarijantnost"⁶ klasične elektrodinamike s obzirom na Galilejeve transformacije (Galilejevu transformaciju brzine predstavlja spomenuta tvrdnja, da je brzina tijela koje se giba u vlaku, mjerena od strane promatrača koji stoji kraj pruge, jednaka zbroju ovih dvaju brzina brzine gibanja vlaka i brzine gibanja tijela u vlaku; inače Galilejevu transformaciju položaja tijela iz sustava S u sustav S', ako su x položaj u sustavu S, x' položaj u u sustavu S', a v njihova relativna brzina, predstavlja jednostavna formula $x' = x - vt$ - jednoliko pravocrtno gibanje duž osi x se pretpostavlja), što bi značilo da se elektromagnetske pojave u raznim sustavima referencije poveznim Galilejevim transformacijama ne bi ne bi dešavale jednako.

Napomenimo da je ova neinvarijantnost, a ona na određeni način odražava neslaganje Maxwellove klasične elektrodinamike s Newtonovom klasičnom mehanikom, koja je s obzirom na Galilejeve transformacije invarijantna, bila uočene još puno prije Einsteinovog rada - njome su se bavili francuski matematičar H. Poincare i nizozemski fizičar A. H. Lorentz, no ni jedan ni drugi iz toga nisu izvukli prave zaključke. Einsteinov zaključak je bio da klasična mehanika nije ispravna teorija (galilejeva invarijantnost u mehanici vrijedi samo za gibanja vrlo malim brzinama, tj. brzinama koje čovjek poznaje iz iskustva, pa je zbog toga smatrana ispravnom), i da je treba modificirati tako da, kao i klasična elektrodinamika bude invarijantna na tzv. Lorentzove transformacije. Ove transformacije izveo je već krajem XIX stoljeća H. A. Lorentz, pri pokušaju objašnjenja rezultata Michelson-Morleyevog eksperimenta, a do sličnih rezultata došli su i J. Larmor i G. Fitzgerald. Tumačenje Lorentzovih transformacija (na osnovi koje dobivamo kvantitativne odnose vezane uz relativističke efekte kao što su dilatacija vremena i skraćivanje dužina u smjeru gibanja), kao i njihovi matematički izrazi dani su na slici koja slijedi.

Inače treba reći da Lorentzova invarijantnost danas predstavlja važan kriterij ispravnosti fizikalnih zakona. Temeljni fizikalni zakon (dakle onaj koji smatramo egzaktnim, a ne aproksimativnim), mora biti invarijantan s obzirom na Lorentzove transformacije da bi ga se uzelo za ozbiljno, a proučavanje ove invarijantnosti dovelo je do važnih zaključaka o ulozi simetrije u modernoj fizici.

6 Govorimo o invarijantnosti ili nepromjenjivosti fizikalnih zakona koje ustanovljavaju promatrači što se jednoliko gibaju jedan prema drugome, odnosno o invarijantnosti s obzirom na različite sustave referencije povezane "transformacijama" određene vrste.



$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \left(\frac{vx}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

Slika 1 - Lorentzove transformacije

Reference:

L. Infeld - Albert Einstein

G. E. Tauber - Einsteinova opća teorija relativnosti

I. Supek - Povijest fizike

Wikipedia

Zagreb, rujan 2011.