

Univerzitet u Sarajevu
Prirodno-matematički fakultet
Odsjek za fiziku
I ciklus studija Opći smjer/Teorijska fizika

Eksperimentalne potvrde specijalne teorije
relativnosti

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
doc. dr. Elvedin Hasović

Kandidatkinja:
Arnela Hrustemović

Sarajevo, juli 2015.

Univerzitet u Sarajevu
Prirodno-matematički fakultet
Odsjek za fiziku
I ciklus studija Opći smjer/Teorijska fizika

Eksperimentalne potvrde specijalne teorije
relativnosti

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
doc. dr. Elvedin Hasović

Kandidatkinja:
Arnela Hrustemović

Sarajevo, juli 2015.

Prvenstveno se zahvaljujem svojoj porodici na neizmjernoj podršci i povjerenju tokom mog cjelokupnog školovanja.

Posebnu zahvalu dugujem svom mentoru, doc. dr. Elvedinu Hasoviću, na strpljenju, trudu i pomoći koju mi je pružio tokom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem i svim svojim profesorima i asistentima na trudu koji su iskazali u prenošenju znanja i na korektnom odnosu u toku cijelog studija.

Zahvaljujem se i svim kolegama i prijateljima što su svojim prisustvom uljepšali i upotpunili ovaj period mog života.

Sarajevo, juli 2015.

Sažetak

Ovaj završni rad predstavlja historijski pregled formulacije i razvoja specijalne teorije relativnosti. U uvodnom dijelu ukratko je predstavljen razvoj nauke od početka razvoja naučne misli do formulacije specijalne teorije relativnosti. Nakon toga slijede postulati STR i njihove posljedice: istovremenost događaja, dilatacija vremena i kontrakcija dužine. Unutar ovog poglavlja obrađene su i Lorentzove transformacije, te njihove posljedice. U trećem poglavlju analizirani su Fizeauov i Michelson-Morleyev eksperiment, koji su prethodili STR, čiji je prvobitni cilj bio da potvrde teoriju etera. U poglavlju broj četiri obrađeni su eksperimenti koji su testirali Einsteinove postulate, kao što su različite verzije Michelson-Morleyevog eksperimenta, Kennedy-Thorndike eksperiment, eksperimenti sa upotrebom lasera, testovi izotropije i testovi brzine svjetlosti. U petom poglavlju su analizirani eksperimenti koji su testirali dilataciju vremena i testovi transversalnog Dopplerovog efekta. Poglavlje šest se bavi testovima relativističke kinematike, elastičnim sudarima, te testovima u kojima je mjerena brzina neutrina. Posljednje poglavlje daje uvid u praktičnu primjenu relativističkih efekata u svakodnevnom životu.

Abstract

This final work represents a historical overview of the formulation and development of special theory of relativity. The introductory chapter briefly describes the development of science from ancient times until the formulation of the special theory of relativity. This is followed by STR postulates and their consequences: the simultaneity of events, time dilation and length contraction. Within this chapter are handled and Lorentz transformations and their consequences. The third chapter reviews Fizeauov the Michelson-Morley experiment, which preceded the STR, whose original purpose was to confirm the theory of ether. In chapter number four it analyzed experiments that tested Einstein's postulates, such as different versions of the Michelson-Morley experiment, Kennedy-Thorndike experiment, experiments with usage of lasers, isotropy tests and tests the speed of light. The fifth chapter analyzes the experiments which tested the time dilation and tests of transverse Dopplers effect. Chapter six deals with tests of relativistic kinematics, elastic scattering, and measuring the speed of neutrinos. The last chapter gives an insight into the practical application of relativistic effects in everyday life.

Sadržaj

1	Uvod	9
2	Postulati STR i njihove posljedice	14
2.1	Posljedice postulata STR	15
2.1.1	Istovremenost događaja	15
2.1.2	Dilatacija vremena	16
2.1.3	Kontrakcija dužine	17
2.2	Lorentzove transformacije	19
2.3	Posljedice Lorentzovih transformacija	20
2.3.1	Kontrakcija dužine	20
2.3.2	Dilatacija vremena	21
2.3.3	Transformacija brzina	22
3	Rani eksperimenti	24
3.1	Fizeauov eksperiment	24
3.2	Michelson - Morleyev eksperiment	26
4	Testovi Einsteinovih postulata	29
4.1	Michelson-Morleyev eksperiment	29
4.2	Kennedy-Thorndike eksperiment	32
4.3	Noviji eksperimenti sa upotrebom lasera	34
4.4	Testovi izotropije korištenjem jednosmjernog prostiranja svjetlosti	36
4.5	Testovi brzine svjetlosti pomoću pokretnih izvora	37
5	Testovi dilatacije vremena i transverzalnog Dopplerovog efekta	39
5.1	Ives-Stilwell eksperiment	39
5.2	Mjerenja vremena života čestica	41
5.3	Mjerenja Dopplerovog pomaka	43

6	Testovi relativističke kinematike	44
6.1	Elastični sudari	44
6.2	Eksperimenti ograničene brzine svjetlosti	48
7	Indirektne potvrde STR	50
8	Zaključak	52

Poglavlje 1

Uvod

U današnjem svijetu, Einsteinovu specijalnu teoriju uzimamo kao nešto što je sigurno ispravno, već dokazano. Međutim, kada je Einsteinova specijalna teorija predstavljena prvi put, 1905. godine, šokirala je naučnike tog vremena, jer je davala jedno potpuno novo viđenje dotadašnje naučne misli. Postavlja se pitanje zašto nam je teorija relativnosti značajna, s obzirom da su njeni efekti u svakodnevnom životu zanemarivo mali. Brzine kojom se tijela kreću u svakodnevnom životu su male u odnosu na brzinu svjetlosti, stoga nam je klasična relativnost dovoljna za razumijevanje pojava oko nas. Međutim, u slučajevima velikih brzina npr. aviona, raketa, satelita, u astrofizici, te kozmologiji, pojave koje predviđa specijalna teorija relativnosti se mogu mjeriti.

Tema ovog rada su eksperimenti koji su potvrdili specijalnu teoriju relativnosti. Kroz eksperimente ćemo razmotriti i posljedice koje nose, te na taj način doći do shvatanja značaja specijalne teorije relativnosti. Prije toga, potrebno je da se upoznamo sa onim što je prethodilo ovoj teoriji.

Pitanja prostora i vremena potiču čak iz Antičkih vremena. Prvi koji je o tome razmišljao je bio starogrčki filozof Aristotel. Dao je veliki doprinos u svim oblastima filozofije i nauke. On je bio stanovišta da je Zemlja nepokretna, a da se Sunce, Mjesec, planete i sve druge zvijezde kreću oko nje po kružnim putanjama. On je došao i do zaključka da Zemlja nije ravna ploča, nego sfernog oblika. Postavio je i neke zakone kretanja, ne matematičkim formulama, nego običnim, jednostavnim jezikom. U njegovo doba, a i mnogo vremena kasnije njegovi zakoni su bili prihvaćeni kao ispravni, sve do vremena kada se došlo do ideje da budu provjereni.

Prvi koji je započeo da propituje ispravnost Aristotelovih stavova bio je Galileo Galilei(1564-1642). Njegov doprinos savremenom shvatanju prostora i vremena ima veliki značaj. Osim što je sumnjao u ispravnost Aristotelovih učenja, to je uspio i dokazati eksperimentalno. Prvo čime je započeo jeste

provjera Aristotelovog zakona gravitacije, tj. pokazao je da brzina kojom tijela padaju na Zemlju ne zavisi od njihove mase. Koristeći durbin, koji je sam konstruisao, uspio je da otkrije Jupiterove satelite. To je u njemu pobudilo misao da ne mora sve da se okreće oko Zemlje, kao što je Aristotel smatrao. On je tim uspio da dokaže ono o čemu su govorili i Nikola Kopernik(1473-1543) i Giordano Bruno(1548-1600). On je prvi naučnik koji je započeo ideju principa relativnosti, koji kaže da su zakoni fizike isti u svim inercijalnim sistemima.

Isaac Newton(1642-1727) je prvi postavio temelje klasične mehanike. U svom djelu Matematički principi filozofije prirode (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) definiše masu, silu, kretanje, te zakon gravitacije i tri zakona kretanja, čime je postavio temelje klasične mehanike. To djelo smatra se jednim od najznačajnijih djela u historiji nauke. Iz Newtonovih zakona, nameće se postojanje inercijalnih sistema, u kojima bi ti zakoni vrijedili. Newton je za referentni sistem uzeo udaljene zvijezde stajačice. Centar ovog sistema referencije je bio centru masa Sunčevog sistema, a ose su usmjere prema zvijezdama stajačicama. S obzirom da Zemlja rotira, sistem referencije vezan za nju nije inercijalan. Čuveni eksperiment za Foucaultovim klatnom, koji je pokazao da Zemlja rotira oko svoje ose za posmatrača sa Zemlje, dokazao je i da je heliocentrični sistem, onaj sistem u odnosu na koji su očuvani položaji ravni oscilovanja klatna. Ovaj eksperiment je omogućio posmatranje rotacije Zemlje oko svoje ose, bez proučavanja kretanja ostalih nebeskih tijela. S obzirom da Zemlja rotira, posmatrač koji se nalazi na njoj nije u inercijalnom sistemu, nego u onom sistemu koji ubrzava. U jednom takvom sistemu javljaju se inercijalne sile. Pored centrifugalne sile koja se javlja u sistemu koji rotira, postoji još jedna fiktivna sila, koja je proporcionalna brzini kojom se tijelo kreće u sistemu koji rotira. Ta sila se naziva Coriolisova sila. Newtonovi zakoni mehanike vrijede za sve sisteme koji se kreću jednoliko jedan u odnosu na drugi. To su tzv. inercijalni sistemi referencije. Da bi se mogli primijeniti u neinercijalnim sistemima, mora se uvesti koncept inercijalnih sila, kao što su centrifugalna ili Coriolisova.

Prema Newtonu, apsolutni prostor je neprekidan, beskonačan, trodimenzionalan, homogen, te su svi pravci (najkraća spojišta između dvije tačke) ravnomjerno zastupljeni. I Aristotel i Newton vjerovali su u apsolutno vrijeme. To je ono vrijeme koje možemo izmjeriti satom, tj. ako je sat jedan tip fizikalnog sistema, mjerenjem upoređujemo jedan sistem s drugim. Vrijeme je bilo zasebno i nezavisno od prostora. Do pojave teorije relativiteta činilo se očiglednim da se događaji mogu nizati u vremenu, nezavisno od položaja u prostoru.

Galilejev princip relativnosti kaže da se u inercijalnim sistemima referencije mehaničke pojave dešavaju na isti način, tj. zakoni mehanike u

svim sistemima referencije imaju isti oblik. Galilejeve transformacije nam omogućavaju da povežemo veličine u dva inercijalna sistema referencije. One se mogu naći ako se posmatraju dva inercijalna sistema S i S'. Pri tome, neka se sistem S' kreće ravnomjerno brzinom V u odnosu na sistem S, duž x ose, te neka se u trenutku $t = 0$ ishodišta ta dva sistema poklapaju. Nakon vremena t , ishodište sistema S' će biti pomaknuto za Vt u smjeru x ose. Tada Galilejeve transformacije imaju sljedeći oblik:

$$\begin{aligned}x' &= x - Vt, \\y' &= y, \\z' &= z.\end{aligned}\tag{1.1}$$

Osnova teorije relativnosti zasnovana je na specifičnom ponašanju svjetlosnih talasa, gdje je jedna od najvažnijih osobina svjetlosti njena brzina. Galilej je čvrsto vjerovao da svjetlost putuje konačnom brzinom. Štaviše, on je bio prvi koji je pokušao da izmjeri brzinu svjetlosti. Godine 1675. Ole Roemer (1644-1710) je izračunano njenu brzinu, mjerivši vidljivost Jupiterovih satelita u odnosu na proračunate pozicije. Na neki način, to je bio prvi potvrđeni element relativnosti, da je brzina svjetlosti konačna.

Newton je smatrao da je svjetlost čestične (korpuskularne) prirode, što se slagalo sa principom relativnosti. Početkom 19. stoljeća došlo se do zaključka da se svjetlost prostire i kao talas. Jedan od najčvršćih dokaza za to jeste interferencija, koja je objašnjavala rezultate Thomas Youngovog(1773-1829) eksperimenta na dvije pukotine. Nakon toga, Fresnel je na osnovu Youngovih radova, proširio teoriju o talasnoj prirodi svjetlosti.

Dosta vremena prije nego što je bila poznata tačna vrijednost brzine svjetlosti, bilo je poznato da je za prostiranje mehaničkih talasa potrebna neka sredina kroz koju bi putovali. Razlog tome leži u činjenici da se talas prostire prenosom vibracija sa jedne čestice na drugu. To je vodilo na misao da je i za prostiranje svjetlosti, potrebna neka sredina kroz koju bi putovali. Upravo radi toga, nastala je potreba za uvođenjem etera, hipotetičke supstance koja ispunjava prostor i koja je nosilac svjetlosnih talasa.

Prema ideji o postojanju etera, on je ispunjavao sav kosmički prostor za koji su do tada smatrali da je prazan. Ova ideja se u to vrijeme činila potpuno logičnom i ispravnom, te je vrlo brzo prihvaćena. Nakon što je Maxwell svojim istraživanjima došao do zaključka da je svjetlost jedna vrsta elektromagnetnih talasa, ideja o eteru se još više učvrstila među naučnicima tog vremena. Stoga su u tom periodu naučnici pokušavali da detektuju eter.

U teoriji Hendrika Lorentza(1853-1928), mehaničke veličine su se pokušale izvesti iz elektrodinamike. To je dovelo do novih spoznaja. Lorentz je došao to dvije temeljne pretpostavke: prva je bila da eter leži čvrsto na prostoru i

druga da elektricitet leži čvrsto na elementarnim česticama u kretanju. Eter bi trebalo da ima određeno stanje kretanja i u skladu s tim, postavilo se pitanje kakav je to sistem referencije za koji je on vezan. Smatralo se da eter miruje u nekom apsolutnom sistemu referencije te da su sva materijalna tijela uronjena u njega i da se kreću u odnosu na takav nepokretni sistem referencije. Ako se svjetlost kreće konstantnom brzinom c , posmatrač, koji bi se kretali različitim brzinama u odnosu na eter bi trebali da mjere različite brzine svjetlosti, a samim tim bi odredili svoje brzine naspram etera. Posmatranjem kretanja Zemlje kroz eter, trebale bi se dobiti različite brzine svjetlosti, u zavisnosti od smjera mjerenja brzine; u smjeru kretanja Zemlje kroz eter ili u suprotnom smjeru.

Aberaciju svjetlosti (astronomsku aberaciju), primijetio je 1727. godine engleski astronom James Bradley (1693-1762), kao prividnu promjenu položaja zvijezda u toku godine. Ovo prividno kretanje nastaje kao rezultat toga da pravac zrake svjetlosti koja dolazi od zvijezde se mijenja u zavisnosti od brzine Zemlje u odnosu na zvijezdu. Da bi se objasnila aberacija svjetlosti, u talasnoj teoriji, bilo je neophodno pretpostaviti da se svjetlost kreće kroz eter, koji je nepomičan u odnosu na heliocentrični sistem referencije, jer u suprotnom, ona ne bi padala okomito na ravan orbite Zemlje. Iz ovoga slijedi da je eter nepomičan u heliocentričnom sistemu, a se svi ostali sistemi kreću u odnosu na njega. Prema ovome, Zemlja ne „vuče“ eter sa sobom. Ova pretpostavka također nije u skladu sa eksperimentom koji je izveo Fizeau. On je izveo ovaj eksperiment 1851.godine, da bi izmjerio brzinu svjetlosti unutar cijevi kroz koju je proticala tekućina (voda). Pomoću interferometra mjerio je brzinu svjetlosti unutar medija. Rezultat njegovog eksperimenta se mogao objasniti pomoću pretpostavke da tijela koja se kreću djelomično „vuku“ eter sa sobom. Međutim, javio se drugi problem – prema Lorentzovoj elektronskoj teoriji, djelimično „vučenje“ etera se moglo pretpostaviti samo za sredine u kojima se svjetlost prelama. S obzirom da indeks loma zavisi od frekvencije posmatrane svjetlosti, to bi značilo da bi bilo potrebno uvesti posebne etere za svaku boju svjetlosti, što je bilo poprilično nerealno.

Malo nakon toga, James Clerk Maxwell(1831-1879) razvija teoriju elektromagnetizma iz koje je proizašao set jednačina, koje su objedinile svojstva elektriciteta i magnetizma, Maxwellove jednačine. U tom periodu dolazi do krize u fizici. Obje teorije (Newtonova i Maxwellova), su bile savršeno dobre, ali se činilo da se ne slažu. Svjetlost je bila poznata kao elektromagnetna pojava, ali se nije podvrgavala zakonima mehanike.

Godine 1881. Albert A.Michelson je izveo eksperimente da bi ustanovio zavisnost brzine svjetlosti od kretanja Zemlje. Ovaj eksperiment je jedan od najznačajnijih eksperimenata u historiji fizike. Ideja i realizacija eksperimenta se sastojala u tome da se mjeri brzina svjetlosti u pravcu kretanja

Zemlje i u pravcu okomitom na Zemlju. Rezultat mjerenja je bio da svjetlost uvijek ima istu brzinu. Koliko god brzo jurili za talasima svjetlosti, oni od nas uvijek odmiču istom brzinom. Nezavisnost brzine svjetlosti od brzine posmatrača protivila se svim predstavama o kretanju. Michelsonovi eksperimenti su uzdrmali temelje klasične mehanike. Fizičari su se dugo vremena borili sa tim rezultatima, pokušavajući ih objasniti na različite načine. Godine 1892. George F. Fitzgerald (1851-1901) i Lorentz nezavisno su došli do zaključka da bi se teorija i eksperiment mogli složiti, ako se pretpostavi da detektor mijenja svoju veličinu i oblik u zavisnosti od svog kretanja. Godine 1898. J. Henri Poincare (1854-1912) je predložio da intervali vremena, kao i dužine, mogu da zavise od posmatrača, te je čak i spekulirao da brzina svjetlosti može biti neograničena. Međutim, nijedan od ovih naučnika nije uspio da u potpunosti da objašnjenje. U to vrijeme, mladi naučnik, Albert Einstein (1879-1955), koji je već sa šesnaest godina pristupio tom problemu kroz jedan drugačiji pogled, kada se zapitao kako bi to bilo putovati zajedno sa svjetlosnom zrakom. Do 1905.godine, pokazao je da Fitzgeraldovi i Lorentzovi rezultati slijede iz jednostavne, ali u to vrijeme radikalne pretpostavke: zakoni fizike, kao i brzina svjetlosti moraju biti isti za sve posmatrače koji se kreću ravnomjerno, bez obzira na stanje njihovog relativnog kretanja. Da bi ovo bilo ispunjeno, vrijeme i prostor ne mogu više biti nezavisni. Oni su „pretvoreni“ jedno u drugo, tako da brzina svjetlosti ostane konstantna za sve posmatrače (Ovo je razlog zašto se tijela u kretanju prividno smanjuju, kao što su Fitzgerald i Lorentz pretpostavili, te zašto posmatrači u kretanju mjere različito vrijeme, kao što je pretpostavio Poincare). Vrijeme i prostor su relativni (zavise od kretanja posmatrača koji ih mjeri). Ovo su osnove Einsteinove specijalne teorije relativnosti.

Poglavlje 2

Postulati STR i njihove posljedice

Albert Einstein je 1905. godine formulisao specijalnu teoriju relativnosti, koja je zasnovana na dva principa/postulata: principu relativnosti i principu brzine svjetlosti[1]. Princip relativnosti Einstein je preuzeo od Galilea, jer se znalo da svi fizikalni zakoni moraju imati isti oblik u svim inercijalnim sistemima referencije, jer se i sve pojave koje oni opisuju odigravaju na isti način. Problem je bio što se činilo da ovaj princip ne vrijedi za Maxwellove jednačine. Iz tog razloga, bilo je potrebno naći nove transformacije između koordinata istog događaja u različitim sistemima referencije, te iste provjeriti. Pri tome, morala se uzeti u obzir i konstantna brzina svjetlosti. Postulati na kojima je zasnovana specijalna teorija relativnosti glase:

1. Svi fizikalni zakoni imaju isti oblik u svim inercijalnim sistemima referencije. Ne postoji izolovani, privilegovani, inercijalni sistem referencije.
2. Brzina svjetlosti u vakuumu je jednaka u svima inercijalnim sistemima referencije. Ona je ista u svim smjerovima i ne ovisi o brzini izvora, niti o brzini posmatrača.

Iz prvog postulata, može se zaključiti da bez korištenja nekog nepokretnog sistema, radi mjerenja brzine posmatrača, ne može se reći ko miruje, a ko se kreće. Ako bi bilo nemoguće naći neku referentnu tačku za mjerenje brzine, bilo bi nemoguće odrediti da li se posmatrač uopće kreće ili ne. Upravo na ovaj način Einstein je došao do zaključka da je svako kretanje relativno, tj. ne može se govoriti o apsolutnom kretanju, nego samo o kretanju u odnosu na nešto.

U vezi sa drugim postulatom, ako brzina svjetlosti ne bi bila ista u svim

sistemima referencije, onda bi njeno mjerenje moglo da se iskoristi za pravljenje razlika između sistema, tj. onda sistemi ne bi bili ravnopravni što je u kontradikciji sa prvim postulatom, prema kojem nema privilegovanog sistema referencije. Svi eksperimenti pokazuju da je brzina svjetlosti ista za sve posmatrača, bez obzira na to kako se oni kreću u odnosu na izvor svjetlosti, ali je i nezavisna od brzine izvora svjetlosti. Nijedan objekat ne može da dosegne brzinu svjetlosti, što pokazuju eksperimenti i teorija. Ta brzina je najveća moguća brzina u prirodi i ona iznosi 299 792 458 m/s [2]. Ova dva postulata predstavljaju temelje na kojima je izgrađena specijalna teorija relativnosti. Iz Einsteinovih postulata, mogu se dobiti transformacije koordinata i vremena prilikom prelaska sa jednog referentnog sistema na drugi. Te transformacije su Lorentzove transformacije. Ipak, prije toga, neophodno je analizirati Einsteinovo shvatanje prostora i vremena.

2.1 Posljedice postulata STR

2.1.1 Istovremenost događaja

Za dva događaja kažemo da su istovremena ako dva sata na mjestu ovih događaja pokazuju isto. Ti satovi moraju imati zajednički početak računanja, inače ne bismo mogli po njima da utvrdimo vrijeme početka događaja u različitim tačkama prostora. Utvrđivanje jedinstvenog početka mjerenja vremena satova u posmatranom inercijalnom sistemu referencije naziva se sinhronizacijom satova u tom sistemu. Postoje različite metode za sinhronizaciju satova:

1. Svi satovi se sinhronizuju na jednom mjestu prema osnovnom satu. Zatim se oni prenose u različite tačke prostora na jednaka rastojanja.
2. Na različitim tačkama na jednakim rastojanjima postave se satovi. Od onog sata koji je podešen u trenutku $t = t_0$ šalje se svjetlosni signal do drugih i kada on stigne do njih, oni se naviju. S obzirom da se svjetlost kreće konstantnom brzinom, potrebno je neko određeno vrijeme da stigne do njih. Sa τ ćemo označiti vrijeme koje je potrebno svjetlosti da dođe od početnog sata do nekog drugog. Tada se taj drugi sat navije da u početku pokazuje vrijeme $t = t_0 + \tau$.

Razlika u pojmu istovremenosti u klasičnom i relativističkom smislu, javlja se kada posmatramo događaje u različitim sistemima referencije. U klasičnoj fizici, dva događaja koja su istovremena u jednom sistemu referencije su istovremena i u drugom sistemu referencije. Vremenski intervali između ta

dva događaja su isti bez obzira da li sat miruje ili se kreće, jer je vrijeme apsolutno. Što se tiče relativističke fizike, ako bi se satovi kretali velikim brzinama, približnim brzini svjetlosti, tada dva događaja koja bi bila istovremena u jednom sistemu, ne bi bila istovremena u drugom, tj. apsolutno vrijeme ne postoji. To možemo pokazati na jednom misaonom eksperimentu. Posmatrajmo voz koji prolazi pored nas, nekom brzinom v . Recimo da se u tom vozu nalaze tri detektora: jedan u sredini i po jedan na krajevima voza. Neka se na sredini voza nalazi svjetlosni izvor. Događaj koji posmatramo je detekcija signala, koji dolazi od svjetlosnog izvora, na krajevima voza. Ovaj događaj možemo registrovati iz sistema referencije koji je vezan za Zemlju, u kojem se voz kreće brzinom v i iz sistema vezanog za voz. Ako se posmatra sa Zemlje, detektor na početku voza se udaljuje od svjetlosnog signala, dok mu se detektor s kraja primiće. Za posmatrača sa Zemlje, svjetlost će prije doći do detektora na kraju voza, nego do onog na početku. Posmatrano iz sistema vezanog za voz, svjetlosni signal dolazi istovremeno do detektora na početku i na kraju voza. Iz ovog primjera zaključujemo da događaj koji je istovremen za posmatrača u vozu, koji se u odnosu na posmatrača na Zemlji kreće brzinom v , nije istovremen za tog nepokretnog posmatrača. Znači, svaki sistem ima svoje vrijeme.

Bitno je napomenuti da kao signale koristimo svjetlosne signale, jer oni imaju osobinu da njihova brzina ne ovisi o brzinama posmatrača.

2.1.2 Dilatacija vremena

Uporedit ćemo dva događaja koji se posmatraju iz dva različita referenta sistema S i S'. Sistem S kreće se brzinom V u odnosu na sistem S', duž x ose. Neka je u pravcu z ose postavljeno ogledalo na udaljenosti d od ishodišta sistema. Svjetlosni signal se emituje kada se ishodišta S i S' poklapaju. Emitovani signal se reflektuje od ogledala i zatim se detektuje kada se vrati, stoga je vremenski interval Δt dat sa kao

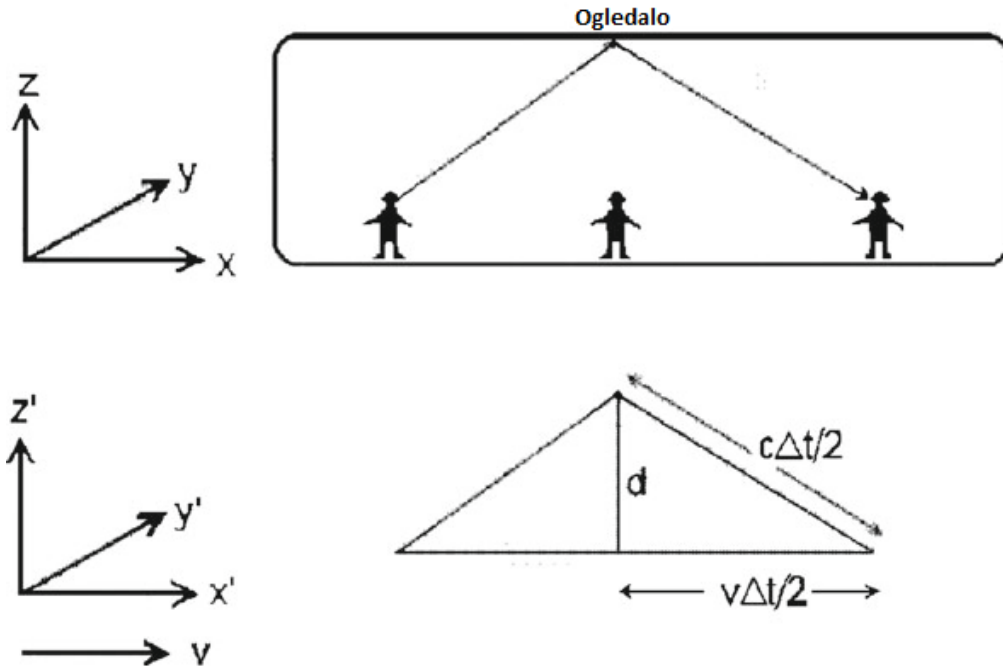
$$\Delta t = \frac{2d}{c}. \quad (2.1)$$

Na osnovu Pitagorine teoreme sa slike 2.1 slijedi:

$$\left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2 + d^2. \quad (2.2)$$

Sređivanjem prethodne relacije dobivamo:

$$\begin{aligned} \Delta t'^2 \frac{c^2 - v^2}{4} &= d^2, \\ \Delta t'^2 &= \frac{4}{c^2 - v^2} d^2. \end{aligned} \quad (2.3)$$



Slika 2.1: Dilatacija vremena

Nakon korjenovanja, dobivamo izraz za $\Delta t'$:

$$\Delta t' = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \Delta t \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2.4)$$

Iz posljednje relacije slijedi da je $\Delta t' > \Delta t$. Ovaj efekat poznat je kao dilatacija vremena: vremenski interval između dva događaja zavisi od stanja kretanja posmatrača.

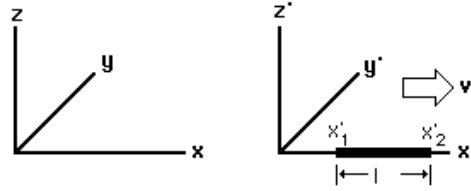
Stvarno vrijeme je vremenski interval koji je mjereno satom u onom sistemu u kojem je sat u stanju mirovanja, tj. sistemu S.

2.1.3 Kontrakcija dužine

Upoređivat ćemo dužine štapa u dva različita referentna sistema. Neka se štap kreće u odnosu na sistem S'. Dužina štapa u sistemu u kojem on miruje naziva se stvarna (prava, sopstvena) dužina, l_0 .

Na jedan kraj štapa postavi se izvor svjetlosti, a na drugi ravno ogledalo. Kada izvor dođe u S' svjetlosni signal se emituje. Vrijeme koje je potrebno sa svjetlost dođe do ogledala je Δt_1 .

Za to vrijeme štap će se pomjeriti za $v\Delta t_1$, stoga je ukupna dužina koju



Slika 2.2: Kontrakcija dužine

svjetlost pređe data kao:

$$c\Delta t_1 = v\Delta t_1 + l. \quad (2.5)$$

Iz prethodne jednačine za vrijeme Δt_1 dobiva se:

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c - v}. \quad (2.6)$$

Vrijeme za koje će se detektor pomaći iz jedne u drugu tačku je Δt_2 . Dužina štapa u sistemu u kojem se kreće data je jednačinom:

$$l = v\Delta t_2 + c\Delta t_2. \quad (2.7)$$

Iz jednačine za dužinu štapa u sistemu S' , slijedi da je vrijeme Δt_2 :

$$\Delta t_2 = \frac{l}{c + v}. \quad (2.8)$$

Ukupno vrijeme Δt jednako je:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.9)$$

Prema relaciji 2.4 slijedi:

$$\Delta t = \Delta t_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Uvrštavajući $\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c}$, slijedi:

$$\begin{aligned} \frac{2l_0}{c} &= \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ l &= l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Iz ovih razmatranja slijedi da je $l < l_0$. Dužina štapa u sistemu u kojem se kreće, manja je od dužine u kojem miruje. Ovaj efekat poznat je kao kontrakcija dužine.

2.2 Lorentzove transformacije

Galilejeve transformacije nisu mogle da povežu inercijalne sisteme koji su se kretali velikim brzinama. Stoga je bilo potrebno naći nove transformacije koordinata.

Svaki događaj određen je njegovim mjestom (x, y, z) i vremenom t . Potrebno je bilo naći koordinate u sistemu S' , ako su poznate koordinate u sistemu S i relativna brzina kretanja sistema S' u odnosu na sistem S . U slučaju kretanja duž x ose, Lorentzove transformacije imaju sljedeći oblik:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \\ y' &= y, \\ z' &= z, \\ t' &= \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \end{aligned} \tag{2.11}$$

Inverzni oblik dobiva se zamjenom $V \rightarrow -V$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \\ y &= y', \\ z &= z', \\ t &= \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \end{aligned} \tag{2.12}$$

Na ovaj način, mogu se dobiti Lorentzove transformacije za bilo koji smjer kretanja. Izvođenje ovih transformacija zasnovano je na Einsteinovim postulatima i pretpostavci homogenosti svih tačaka prostora i vremena.

Važno je naglasiti da pri malim brzinama u odnosu na brzinu svjetlosti, Lorentzove transformacije se svode na Galilejeve. Znači, ako vrijedi $V \ll c$, možemo zanemariti $(\frac{V}{c})^2$.

Iz toga slijedi:

$$x \approx x' + Vt', \quad t' \approx t.$$

Iz ovoga se vidi da u slučaju malih, tj. klasičnih brzina, zakoni transformacije u specijalnoj teoriji relativnosti i u klasičnoj mehanici su identični. Ovo je jako značajno, iz razloga što pokazuje da specijalna teorija relativnosti

ne odbacuje Galilejeve transformacije kao netačne, nego su one specijalan slučaj Lorentzovih transformacija.

2.3 Posljedice Lorentzovih transformacija

2.3.1 Kontrakcija dužine

Jedna od posljedica koja slijedi direktno iz Lorentzovih transformacija jeste kontrakcija dužina: dužine štapova skraćuju se u sistemima u kojima se oni kreću, duž pravca kretanja. Kao i ranije razmatrat ćemo dva sistema S i S'. U specijalnoj teoriji relativnosti dužine se mjere pomoću svjetlosnih signala. Neka u sistemu S' štap miruje i neka leži na x' osi, a njegov početak se nalazi u koordinatnom početku. U početnom trenutku, počeci koordinatnih sistema se poklapaju i odašilje se signal. Dužina štapa u sistemu u kojem miruje je l_0 . Neka su x'_1 i x'_2 , koordinate početka i kraja štapa. Tada je $l_0 = x'_2 - x'_1$ i ova dužina se naziva vlastitom dužinom. Sada je potrebno naći dužinu štapa u sistemu S, koji se kreće ravnomjerno brzinom V u odnosu na sistem S', paralelno x' osi. Analogno, dužina štapa u sistemu S je $l = x_2 - x_1$, gdje su x_1 i x_2 trenutne koordinate početka i kraja štapa, izmjerene u istom trenutku. Prema tome vrijedi:

$$x'_2 = \frac{x_2 - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (2.13)$$

$$x'_1 = \frac{x_1 - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (2.14)$$

Oduzimanjem prethodnih jednačina, slijedi:

$$\begin{aligned} x'_2 - x'_1 &= \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \\ l &= l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

S obzirom da je potkorjena veličina manja od 1, iz posljednje jednačine slijedi da je $l < l_0$. Ovak rezultat pokazuje da dužina ima relativan karakter. Znači, nema smisla govoriti o udaljenosti između dvije tačke ako ne definišemo sistem referencije u kojem je ta veličina data. Udaljenost koja je izmjerena ovisi o kretanju tog referentnog sistema. Treba naglasiti, da se unutar tijela ne dešavaju nikakva unutrašnja naprezanja koja izazivaju deformaciju.

2.3.2 Dilatacija vremena

Druga važna posljedica Lorentzovih transformacija jeste dilatacija vremena: sat koji se kreće u odnosu na posmatrača pokazuje manje vrijeme nego sat koji miruje u odnosu na posmatrača. Ili drugačije rečeno, sat koji se kreće, kasni u odnosu na sat koji miruje. Da bismo to pokazali, posmatrat ćemo dva događaja u sistemu S' koji su se dogodili i trenucima t'_1 i t'_2 . Tada je vremenski interval između ta dva događaja $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$. Sistem S' se kreće brzinom V u odnosu na sistem S, duž x ose.

Iz Lorentzovih transformacija (2.11) slijedi:

$$t_1 = \frac{t'_1 + V \frac{x'_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (2.16)$$

$$t_2 = \frac{t'_2 - V \frac{x'_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (2.17)$$

Oduzimanjem ove dvije relacije dobivamo:

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (2.18)$$

Vrijeme Δt_0 mjereno u sistemu referencije koji se kreće zajedno sa tijelom u kojem se odvijaju posmatrani događaji naziva se vlastitim vremenom. Iz posljednje jednačine se može zaključiti da je vlastito vrijeme manje od vremena između ta dva događaja u drugom sistemu.

Ovim rezultatom dobio se potpuno novi pogled na vrijeme. Prije toga, smatralo se da je vrijeme isto za sve posmatrače, gdje god da se oni nalaze i kako god da su se kretali, tj. vrijeme je bilo apsolutno. Ovi rezultati su pokazali da je to netačno; vrijeme prolazi različito za pomatrače koji su u relativnom kretanju. Također, vrijeme je različito za posmatrače koji miruju jedan u odnosu na drugog, ali se nalaze na velikim rastojanjima.

Dilatacija vremena poslužila je za prve testove provjere ispravnosti specijalne teorije relativnosti, pomoću perioda poluraspada miona. U današnje vrijeme, ova osobina se uzima u obzir prilikom sinhronizacije atomskih satova koji se nalaze u 24 satelita GPS sistema, sa stacionarnim atomskim satovima na Zemlji, u cilju tačnog određivanja položaja na Zemlji. Poznato je da se mjerenje dužine, odnosno udaljenosti, svodi na mjerenje vremena koje je potrebno svjetlosti da pređe tu udaljenost.

2.3.3 Transformacija brzina

Suprotno Newtonovoj mehanici, brzine u specijalnoj teoriji relativnosti, ne mogu se jednostavno "dodavati", jer bi u suprotnom posmatrač koji se kreće prema izvoru svjetlosti mogao mjeriti brzinu veću od brzine svjetlosti, što nije u skladu sa drugim postulatom specijalne teorije relativnosti. Kao i u prethodnim razmatranjima, posmatraju se sistemi S i S', koji se kreću brzinom V jedan u odnosu na drugi. Neka se u sistemu S materijalna tačka kreće. Komponente vektora brzine te čestice određene iz sistema S' su:

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}; u'_y = \frac{dy'}{dt'}; u'_z = \frac{dz'}{dt'}. \quad (2.19)$$

Komponente vektora brzine kojom se čestica kreće u sistemu S su date sa:

$$u_x = \frac{dx}{dt}; u_y = \frac{dy}{dt}; u_z = \frac{dz}{dt}. \quad (2.20)$$

Korištenjem relacija za Lorentzove transformacije, slijedi:

$$dx' = \gamma(dx - Vdt); dy' = dy; dz' = dz; dt' = \gamma(dt - \frac{V}{c^2}dx), \quad (2.21)$$

gdje je $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$.

Iz dobivenih relacija, jednostavnim postupkom se dobiva:

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - Vdt}{dt - \frac{V}{c^2}dx} = \frac{\frac{dx}{dt} - V}{1 - \frac{V}{c^2}\frac{dx}{dt}} = \frac{u_x - V}{1 - \frac{Vu_x}{c^2}}. \quad (2.22)$$

Analogno tome za u'_y i u'_z se dobiva:

$$u'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\gamma(dt - \frac{V}{c^2}dx)} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\gamma(1 - \frac{Vu_x}{c^2})} = \frac{u_y}{\gamma(1 - \frac{Vu_x}{c^2})}, \quad (2.23)$$

$$u'_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{\gamma(dt - \frac{V}{c^2}dx)} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\gamma(1 - \frac{Vu_x}{c^2})} = \frac{u_z}{\gamma(1 - \frac{Vu_x}{c^2})}. \quad (2.24)$$

U slučaju klasičnih brzina $V \ll c$, u prvom redu za brzine vrijedi :

$$\begin{aligned} u'_x &\approx u_x - V, \\ u'_y &\approx u_y, \\ u'_z &\approx u_z. \end{aligned}$$

Postulati STR i njihove posljedice

U ultrarelativističkom slučaju kada $u_x \rightarrow c$, dobiva se $u'_x \rightarrow \frac{c-V}{1-\frac{V}{c}} = c$. Ovo je u saglasnosti sa postulatom o brzini svjetlosti, gdje je c maksimalna moguća brzina.

Inverzna transformacija brzina dobiva se zamjenom $u_i \rightarrow u'_i$ i $V \rightarrow -V$.

$$\begin{aligned}u_x &= \frac{u'_x + V}{1 + \frac{Vu'_x}{c^2}}, \\u_y &= \frac{u'_y}{\gamma(1 + \frac{Vu'_x}{c^2})}, \\u_z &= \frac{u'_z}{\gamma(1 + \frac{Vu'_x}{c^2})}.\end{aligned}\tag{2.25}$$

Poglavlje 3

Rani eksperimenti

3.1 Fizeauov eksperiment

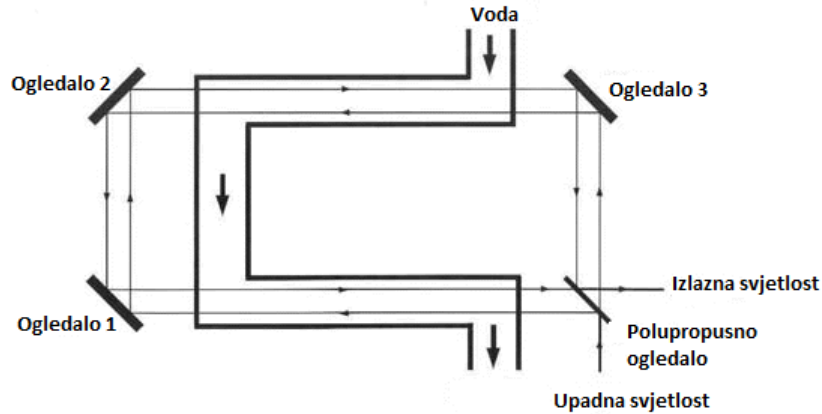
Godine 1818. Augustin Fresnel objasnio je da kretanje Zemlje nema nikakav utjecaj na zakone prelamanja zato što se eter djelimično kreće za Zemljom, tako da su i svjetlosni talasi unutar optičkog medija vučeni zajedno za eterom. Fresnel je dao i formulu za ovo djelimično "vučenje", te je ona poznata kao Fresnelova formula:

$$u = \frac{c}{n} \pm v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right), \quad (3.1)$$

gdje je u brzina svjetlosti kroz medij u odnosu na Zemlju, v je brzina medija, c je brzina svjetlosti u vakuumu, n indeks je prelamanja datog medija. Fresnelove pretpostavke su potvrđene 1851. godine Fizeauovim eksperimentom, u kojem je, pomoću interferometra, mjerena brzina svjetlosti u cijevi kroz koju protiče voda [3]. Brzina svjetlosti je mjerena u smjeru proticanja i u suprotnom smjeru. Fizeau je rezultate kojim potvrđuje Fresnelovu formulu izložio u septembru 1851. Akademiji za nauku u Parizu.

Eksperimentalna postavka sastojala se od staklenih cijevi, dijametara oko 5.3 mm, te velike dužine. Svjetlost je usmjeravana na polupropusno ogledalo 3.1. Jedan dio svjetlosnog snopa se reflektuje i prolazi kroz donju cijev u smjeru suprotnom od smjera proticanja vode. Nakon toga, zraka se reflektuje od ogledala 1 i 2, opet u smjeru suprotnom od toka vode. Zatim, svjetlosna zraka se reflektuje na ogledalu 3 prema polupropusnom ogledalu. Drugi dio svjetlosnog snopa prolazi kroz polupropusno ogledalo, te putuje kroz cijevi u smjeru proticanja vode, te se na kraju ponovo pridružuje prvoj zraci, gdje se te dvije zrake upoređuju pomoću interferometra.

Kada bi eter bio stacionaran, tada bi brzina svjetlosti koja se mjeri bila ista u sistemu koji je vezan za eter i u sistemu koji se kreće zajedno sa vodom. U tom slučaju, mjerena brzina svjetlosti bi iznosila $u = c/n$. Ako bi se u



Slika 3.1: Prikaz eksperimentalne postavke Fizeauovog eksperimenta

jednom trenutku eter mogao povući, da se kreće zajedno sa sistemom koji se kreće sa vodom, tada bi brzina svjetlosti iznosila $u = c + v$, gdje je v brzina vode. Međutim, ako bi eter mogli povući samo djelomično onda bi brzina iznosila $u = c + kv$, gdje je k neki parametar. Iz rezultata koji je dobio Fizeau, možemo zaključiti da je parametar k upravo $(1 - \frac{1}{n^2})$. Rezultat ovog eksperimenta mogao se objasniti tako da se eter djelimično kreće sa sistemom u kojem se prostire svjetlost.

Međutim, ovakvo objašnjenje se nije moglo održati, jer prema Lorentzovoj elektronskoj teoriji djelimično vučenje etera, od strane tijela koja se kreću, moguće je samo u sredinama gdje se svjetlost prelama. U dobivenoj formuli javlja se indeks loma, koji ovisi o frekvenciji svjetlosti, što znači da bi djelimično kretanje etera ovisilo i o frekvenciji svjetlosti. Ovo vodi na zaključak, da bi bilo potrebno uvesti posebne etere za svaku boju svjetlosti, što je nemoguće.

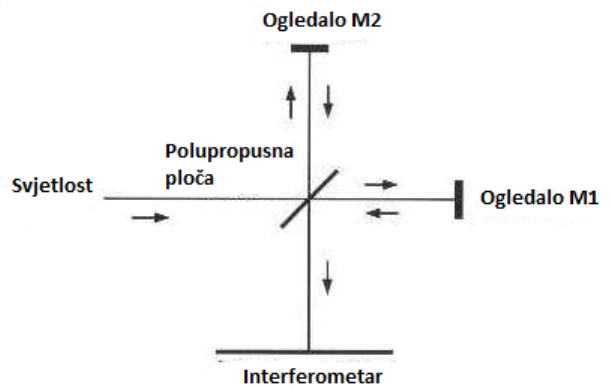
Nekoliko godina nakon ovog eksperimenta, Martinus Hoek provodi sličan eksperiment, koristeći sličnu aparaturu. Rezultat tog eksperimenta je također potvrdio prvobitnu Fresnelovu formulu.

3.2 Michelson - Morleyev eksperiment

Svrha Michelsonovog eksperimenta, prvi put izvedenog 1881. godine, bila je izmjeriti brzinu Zemlje u odnosu na eter. Godine 1887. Albert A. Michelson (1852-1931) i Edward W. Morley (1838-1923) su sa većom preciznošću ponovili ovaj eksperiment [4]. Rezultati dobiveni ovim eksperimentom, bili su u suprotnosti sa teorijom o eteru.

Pomoću instrumenta, danas poznatog kao Michelsonov interferometar, mjerena je brzina svjetlosti u dva, međusobno okomita, pravca. Monohromatska svjetlost iz izvora se usmjeri na polupropusnu, posrebnenu staklenu ploču, koja razdvaja svjetlosni snop. Jedan dio se reflektuje okomito, a drugi propušta. Obje zrake se reflektuju na ogledalima, koja su postavljena na udaljenosti L od ploče. Ove zrake se vraćaju nazad na polupropusnu ploču, gdje se ponovo spajaju i ulaze u uređaj, gdje te zrake međusobno interferiraju, te se usljed razlika u fazi, opaža interferenciona slika. Uređaj je bio smješten na postolju koje je plivalo u živi s ciljem smanjenja vibracija i deformacija usljed rotacije sistema.

Prvo ćemo razmatrati slučaj kada je interferometar postavljen tako da je osa uređaja u smjeru kretanja Zemlje kroz eter. Brzina kretanja Zemlje kroz eter



Slika 3.2: Eksperimentalna postavka Michelson-Morleyevog eksperimenta

je v . Vrijeme koje je potrebno svjetlosti da stigne od polupropusne ploče P do ogledala M_1 je $\frac{L}{c+v}$, a da se vrati nazad do P je $\frac{L}{c-v}$. Tada je ukupno vrijeme zbir ova dva:

$$t_1 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2L}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}. \quad (3.2)$$

Sada ćemo razmatrati snop svjetlosti koji se kreće u okomitom pravcu u odnosu na smjer kretanja Zemlje. Vrijeme koje je potrebno da svjetlost dođe do ogledala M_2 i vrati se nazad je:

$$t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.3)$$

Vremenska razlika između zraka koje ulaze u interferometar je:

$$t_1 - t_2 = \frac{2L}{c} \left[\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] \quad (3.4)$$

Ako čitav sistem zaokrenemo za 90° , nove vrijednosti t_1 i t_2 će biti:

$$t'_1 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3.5)$$

$$t'_2 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2L}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}. \quad (3.6)$$

U ovom slučaju, vremenska razlika zraka koje ulaze u interferometar je:

$$t'_1 - t'_2 = \frac{2L}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right] \quad (3.7)$$

Vremenska razlika između ovih zraka data je kao:

$$\Delta t = (t_1 - t_2) - (t'_1 - t'_2) = \frac{4L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (3.8)$$

S obzirom da je $\frac{v^2}{c^2}$ mala veličina, možemo upotrijebiti sljedeću aproksimaciju: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x}} \approx 1 + \frac{x}{2}$. Slijedi: $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$.

Možemo pisati:

$$\Delta t \approx \frac{4L}{c} \left[\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 - \frac{v^2}{2c^2} \right] = \frac{2Lv^2}{c^3} \quad (3.9)$$

Razlika puteva koje su zraci prešli jednaka je $\Delta d = c\Delta t = \frac{2Lv^2}{c^2}$. Pomjeranje interferencione slike karakterisano je veličinom $s = \frac{\Delta t}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$. Uvrštavajući

odgovarajuće vrijednosti $\lambda = 500\text{nm}$ i $L = 11\text{m}$, te razliku pređenih puteva $\Delta d = 2.2 * 10^{-7}\text{m}$, dobiva se da je $s = 0,44$.

Michelsonov interferometar mogao je da opazi pomak linija reda 10^{-2} , ali unatoč tome, nikakav pomak linija nije zapažen, niti u jedno doba godine. Ovaj eksperiment ponavljan je više puta, u različitim uslovima, sa znatnim poboljšanjem tačnosti, ali je uvijek davao negativan rezultat. Naučnici tog vremena postavljali su mnogobrojne hipoteze kojima su nastojali objasniti rezultate ovog eksperimenta, te spasiti postojanje etera. Međutim, nijedan od tih pokušaja nije se održao. Tek pojavom Einsteinove specijalne teorije, rezultati ovog eksperimenta mogli su biti objašnjeni nepostojanjem etera kao medijuma za prostiranje svjetlosti.

Poglavlje 4

Testovi Einsteinovih postulata

4.1 Michelson-Morleyev eksperiment

Nakon što su 1887. godine Michelson i Morley objavili svoje eksperimente, oni su odvojeno nastavili da rade u tom području. Morley je konstruisao interferometar koji je bio četiri puta precizniji od onog koji je prvobitno korišten. Pretpostavka je bila da bi korištenjem ovog interferometra pomak interferencionih linija trebao biti oko 1.1. Opažanja ovim uređajem vršena su tokom 1904. godine. Postupak je bio baziran na kombinaciji dnevnog i godišnjeg kretanja Zemlje, zajedno sa pretpostavljenim kretanjem Solarnog sistema prema sazviježđu Hercules, brzinom 19 km/s. Opažanja su vršena onim danima kada se rezultanta ovih kretanja dva puta dnevno nalazila u ravni interferometra. S obzirom da su mjerenja vršena dva puta na dan, faze su bile skoro u potpunosti suprotne, tako da je rezultat bio približno jednak nuli. Dobiveni rezultat nije bilo u skladu sa očekivanim. Nakon toga, Morley je započeo mjerenja zajedno sa Dayton Millerom (1866-1941).

U jesen, 1905. godine Morley i Miller su premjestili interferometar iz laboratorija u kojem se nalazio, na višu nadmorsku visinu, s ciljem izbjegavanja grešaka usljed okolnih građevina. Tokom 1905. i 1906. godine su vršili opažanja. Rezultati koji su dobili bili su deseti dio od očekivanog pomaka.

Nakon toga, Miller nastavlja sa samostalnim radom. Njegov rad se nastavio sve do sredine 30-ih godina. U periodu 1921-1928 Miller je dodatno poboljšao osjetljivost svog interferometra. U to vrijeme, Millerov interferometar je bilo najveći i najosjetljiviji interferometar ikad konstruisan. Njegova najvažnija istraživanja su bila ona u opservatoriju Mount Wilson u Kaliforniji. Najviše mjerenja je izveo tokom 1925. i 1926. godine. U svim svojim eksperimentima dobio je pomak interferencionih linija, koji je bio mali, ali mjerljiv, oko 0.088. Vrijednosti su varirale tokom godine, ali i tokom dana.

Razlog tome jeste rotacija Zemlje, što je Miller iskoristio za analizu dobivenih rezultata. Miller je, kao rezultat teorijske analize, dobio da se naš Solarni sistem kreće brzinom 208 km/s, te je odredio i pravac kretanja Zemlje. Rezultati koje je on dobio pokazuju da se Zemlja u odnosu na eter hipotetički kreće brzinom 10 km/s [5].

Specijalna teorija relativnosti, koja je u to vrijeme bila prihvaćena među naučnicima, nije predviđala postojanje faznog pomaka. Upravo radi toga, Millerov rad je nailazio na kritike. Einstein je smatrao da su rezultati Millerovih eksperimenata greška nastala usljed toplotnih utjecaja. Još jedan veliki kritičar Millerovog rada, nakon njegove smrti, je bio njegov bivši student Robert Shankland (1887-1968). Njegova kritika se sastojala u tome da postoji temperaturna razlika u različitim granama Michelsonovog interferometra. Međutim, nikada nije iznio neki konkretan dokaz za takve tvrdnje.

Godine 1933. Miller objavljuje rezultate svojih eksperimenata u časopisu *Reviews of Modern Physics* [7]. On je u svom radu iznio pozitivne rezultate svojih eksperimenata. Pored Millerovih eksperimentana, pozitivne rezultate u eksperimentima za detekciju etera dobili su Georges Sagnac (1869-1928) 1913., Michelson i Henry Gale (1874-1942) 1925. godine, bilježeći promjene u brzini svjetlosti [6]. Međutim, eksperimentalna postavka nije bila adekvatna za detaljnija ispitivanja o eteru.

Millerov rad je podržao Michelson, objavivši 1929. godine *Repetition of the Michelson-Morley Experiment* [8]. Taj rad je bio izvještaj o tri pokušaja detekcije etera, koristeći interferenciju svjetlosti, slično kao i u prvobitnom Michelson-Morleyevom eksperimentu. U prvom eksperimentu, koji je izveden u junu 1926. godine, očekivani pomak iznosio je 0.017. Međutim, nikakav pomak tog reda nije bio opažen. Drugi eksperiment izveden je u jesen 1927. godine. Rezultat je bio isti kao i prethodni - nije opažen očekivan pomak. Treći eksperiment izveden je 1928. godine u Mount Wilson opservatoriju na višoj visini od prethodnih, te povećanoj dužini puta koju svjetlost pređe. Ovog puta opažen je mali pomak, ali s obzirom da je bio mnogo manji od očekivanog rezultat eksperimenta je bio negativan. Millerovi eksperimenti su ponovo analizirani i objavljeni u *Review in Modern Physics* 1955 [9]. godine. Došlo se do zaključka da Miller nije dobio nultu vrijednost pomaka linija jednim dijelom zbog statističkih oscilacija, a jednim dijelom zbog lokalnih temperaturnih uslova [9]. Ono što je jako bitno, jeste da su originalni rezultati sačuvani, te da su dostupni na korištenje.

Još jedna ponovna analiza ovog eksperimenta jeste iz 2006. godine: T.J. Roberts, *An Explanation of Dayton Miller's Anomalous 'Ether Drift' Result* [10]. Ovaj rad detaljno objašnjava kako i zašto je Miller dobio pogrešne rezultate u svojim eksperimentima, te pokazuje da njegovi rezultati statistički nisu značajni. U vrijeme kada je Miller izvodio svoje eksperimente nije bila

Testovi Einsteinovih postulata

poznata digitalna obrada signala, pomoću koje se analizom greške može odrediti da li je dobiveni signal stvaran, tj. da li nam je on od značaja. Novija analiza postojećih podataka, dala je vrijednost nula za pomak interferencione slike, što je u skladu sa specijalnom teorijom relativnosti, te stavlja gornju granicu na apsolutno kretanje Zemlje od oko 6 km/s, sa pouzdanošću oko 90%. U narednoj tabeli predstavljen je pregled očekivanih i dobivenih rezultata eksperimenata Michelson-Morleyevog tipa 4.1.

Name	Year	Arm length (meters)	Fringe shift		Experimental Resolution	Upper Limit on v_{aether}
			expected	measured		
Michelson	1881	1.2	0.04	0.02		
Michelson + Morley	1887	11.0	0.4	< 0.01		8 km/s
Morley + Morley	1902–04	32.2	1.13	0.015		
Miller	1921	32.0	1.12	0.08		
Miller	1923–24	32.0	1.12	0.03		
Miller (Sunlight)	1924	32.0	1.12	0.014		
Tomascheck (Starlight)	1924	8.6	0.3	0.02		
Miller	1925–26	32.0	1.12	0.088		
Miller (re-analysis in 2006, see note)	1925–29	32.0	1.12	0.000	0.015	6 km/s
Kennedy (Mt Wilson)	1926	2.0	0.07	0.002		
Illingworth	1927	2.0	0.07	0.0002	0.0006	1 km/s
Piccard + Stahel (Mt Rigi)	1927	2.8	0.13	0.006		
Michelson et al.	1929	25.9	0.9	0.01		
Joos	1930	21.0	0.75	0.002		

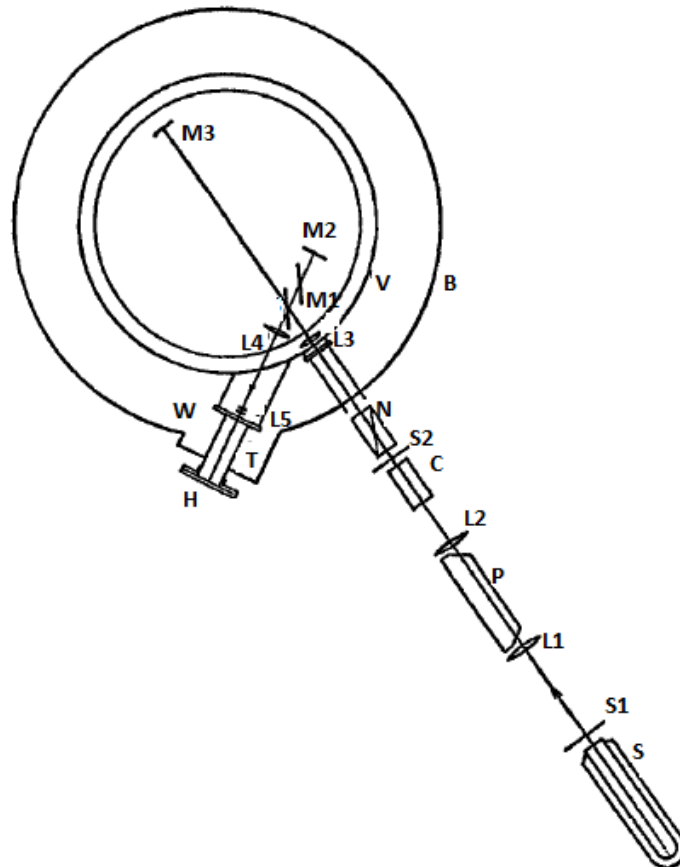
Slika 4.1: Tablica eksperimentata koji su pokušavali detektovati kretanje Zemlje kroz eter. Unutar tablica date su očekivane vrijednosti pomaka i one koje su zaista zabilježene. Preuzeto iz [9].

Još neka od ponavljanja Michelson-Morleyevog eksperimenta:

- Georg Joos izveo Michelson-Morleyev eksperiment u vakuumu [11],
- K.K. Illingworth postigao znatno bolju rezoluciju aparature, pomoću naprednije tehnike [12],
- Shamir i Fox su ponovili Michelson-Morleyev eksperiment, koristeći razliku optičkih puteva u pleksiglasu ($n=1.49$), te su prijavili nulti rezultat sa gornjom granicom na brzinu 6.64 km/s [13].

4.2 Kennedy-Thorndike eksperiment

Kennedy-Thorndike eksperiment prvi put je izveden 1932. godine, kao modifikacija Michelson-Morleyevog eksperimenta [14]. Michelson-Morleyev eksperiment je pokazao da je brzina svjetlosti nezavisna od orijentacije aparature, dok je Kennedy-Thorndikeov eksperiment pokazao da je brzina svjetlosti također nezavisna od brzine aparature u različitim intercijanim sistemima. Ovaj eksperiment se koristi i za indirektno dokazivanje dilatacije vremena. Modifikacija ovog eksperimenta se sastojala u tome što, za razliku od Michelson-Morleyevog eksperimenta, dužine krakova aparature nisu bile iste, te nisu bile postavljene pod pravim uglom. Postavka ovog eksperimenta prikazana je na slici 4.2.



Slika 4.2: Eksperimentalna postavka Kennedy-Thorndikeovog eksperimenta

Svjetlost iz izvora S , prolazi kroz mali kružni otvor na ekranu S_1 , te se pomoću leće L_1 usmjerava na prizmu P , odakle se dobiva zelena svjetlost talasne dužine $\lambda = 546.1\text{nm}$. Pomoću leće L_2 , svjetlost se usmjerava na ekran

S_2 . Vodena ćelija C služi za apsorpciju viška toplotnog zračenja. Nakon prolaska kroz S_2 , svjetlost se polarizuje Nicolovom prizmom, tako da je električni vektor horizontalan, a zatim ulazi u vakuumsku komoru V . Pomoću leće L_3 nastoji se postići najveći mogući intenzitet u interferencionom uzorku.

Svjetlost se zatim razdvaja pomoću polupropusnog ogledala M_1 , koji je postavljen pod Brewsterovim uglom s ciljem sprečavanja neželjenih površinskih refleksija. Razdvojene zrake se nakon refleksije na ogledalima M_2 i M_3 ponovo vraćaju do M_1 , gdje se jedna zraka djelimično transmituje, a druga djelimično reflektuje kroz leće L_4 i L_5 . Ove leće fokusiraju svjetlost na široku horizontalnu pukotinu, ispred fotografske ploče H , da bi se dobila interferencionna slika. Ploča je lagano pričvršćena za cijev T , na čijoj suprotnoj strani se nalazi otvor vakuumske cijevi W . Veći dio cijevi T i vakuumske komore, nalazi se u rezervoaru V koji sadrži vodu, koja se održava na konstantnoj temperaturi 0.001°C . To omogućava da promjene sobne temperature ne utječu na fokusiranje slike, a tim i na dijemetre prstenova.

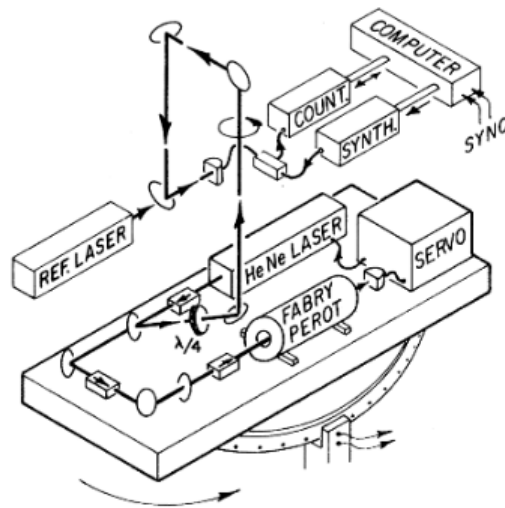
Razlog zašto je korištena svjetlost talasne dužine $\lambda = 546,1\text{nm}$ jeste taj što je za izvedbu eksperimenta bila potrebna svjetlost koja bi omogućila interferenciju sa velikom razlikom u fazi, te je intenzitet morao da bude poprilično veliki. Najbolje efekte je davala linija živinog spektra ove talasne dužine. Umjesto snimanja interferencionih linija u realnom vremenu, kao u većini drugih eksperimentata u to vrijeme, korištene su fotografije tih linija.

Postavljajući različite dužine krakova, promjena brzine u kretanju Zemlje bi prouzrokovala promjene u brzini kretanja svjetlosnih zraka. Upravo to bi dovelo do pomjeranja interferencionih linija, osim kada bi se frekvencija svjetlosnog izvora promijenila u istoj mjeri. Da bi se utvrdilo da li je došlo do pomaka, napravljen je izuzetno stabilan interferometar, te su interferencioni uzorci slikani da bi se kasnije mogli upoređivati. Testiranja su vršena mjesecima, međutim, nikakav pomak nije otkriven. Princip upoređivanja je sljedeći: Dio fotografije koji se ispituje napravljen je tako da se zajedno s njim pojavi skoro identična fotografija koja se koristi kao referenca za cijelu seriju. Na ovaj način se uočavaju veoma male razlike između reference i mjerenih uzoraka.

Koristeći LLR (Lunar Laser Ranging) ovaj eksperiment je ponavljan više puta, gdje je udaljenost Zemlja-Mjesec bila izražena u centimetrima. Ako bi postojao privilegovani sistem referencije, te ako bi brzina svjetlosti zavisila od brzine posmatrača, tada bi trebale biti vidljive promjene u mjerenju udaljenosti Zemlja-Mjesec. Međutim, ni u kakvim opservacija nisu opažene takve promjene. To je vodilo na zaključak da i kontrakcija dužine i dilatacija vremena moraju imati vrijednosti predviđene specijalnom teorijom relativnosti [15].

4.3 Noviji eksperimenti sa upotrebom lasera

A. Brillet i J.L.Hall su 1978. godine na Joint Institute of Laboratory Astrophysics, izveli poboljšani eksperiment tipa Michelson-Morleyevog [16]. Ideja se sastojala da pomoću optičkih rezonatora bilježe promjene frekvencije, koja je u direktnoj vezi sa talasnom dužinom. U eksperimentu je korišten He-Ne laser, koji je bio namješten tako da mu je zračenje zadovoljavalo granične uslove unutar Fabry-Perotovog rezonatora. Čitav sistem se nalazio na postolju koji se mogao rotirati, slika 4.3. Pomoću ogledala jedan dio laserske svjetlosti se rotirao zajedno sa sistemom, dok je drugi usmjeravan okomito na sistem koji rotira. Koristeći drugi, referentni laser, bilo je moguće detek-

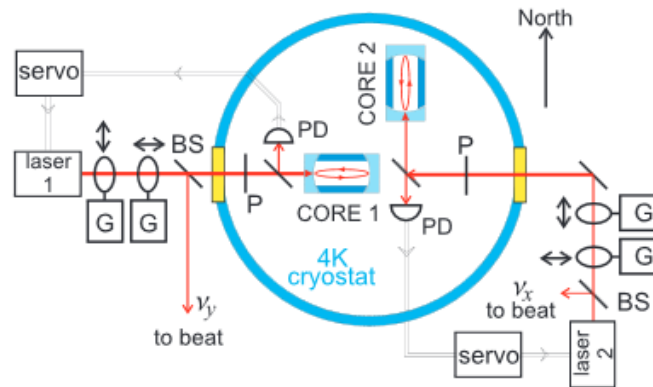


Slika 4.3: Shema eksperimenta izotropije prostora. Preuzeto iz [16]

tovati vrlo male promjene frekvencije. Kao etalon dužine korišten je interferometar sa posebnim ogledalima, radijusa 50 cm. Dielektrični premazi preko centara ogledala, su omogućavali veću efikasnost interferometra, oko 25%, te širinu linija $\approx 4.5\text{MHz}$. Interferometar je bio smješten unutar masivne, termički izolovane, vakuumske ovojnice od aluminija. Spoljašnja temperatura je održavana na 0.2°C . Rezultati ovog eksperimenta dali su pomak od $(1.5 \pm 2.5)10^{-15}$. Očekivani pomak, mogao se izračunati pomoću brzine kretanja Zemlje oko Sunca. On je iznosio $\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \approx \frac{1}{2} 10^{-8}$, što je za 5×10^{-7} manje od opaženog. Rezultat koji su dobili je bio 4000 puta bolji od prethodno izmjenjenog u eksperimentu T.S. Jaseja [17]. Razlog tome jesu manji lažni signali, bolje tehnike obrade signala, te bolja dugoročna stabilnost dužine etalona i referentnog lasera.

U drugom eksperimentu, koji je zasnovan na sličnom principu, korišten je kriogeni optički rezonator [18]. Upoređivane su frekvencije rezonatora koji su bili postavljeni okomito jedan u odnosu na drugi. Na ovaj način udvostručava se signal. Kriogeni optički rezonator koji je korišten omogućavao je veliku preciznost u mjerenjima. Ovaj eksperiment je bio moderna izvedba Michelson-Morleyevog eksperimenta, gdje su se opažanja vršila oko godinu dana. Na slici 4.4 je dat shematski prikaz ovog eksperimenta. Jezgra rezonatora nalazila su se unutar kriostata sa tekućim helijem, a oko se nalazio okvir sa tekućim nitrogenom. Jezgra su se nalazila unutar bakarnih kutija, da bi bila zaštićena od temperaturnih utjecaja. Korišteni su Nd:YAG laseri, a laserske zrake su spajane preko otvora rezonatora. Razlika frekvencija je mjerena pomoću kvarcnog oscilatora.

Rezultati koji su dobiveni su dali tri puta manje ograničenje na parametar narušenja izotropije, nego prethodni eksperiment Brilliet-Halla [16], dok je za moguću anizotropiju brzine svjetlosti dobiveno $(2.6 \pm 1.7)10^{-15}$. U okviru standardnog modela fizike elementarnih čestica, uspjeli su postaviti ograničenje na sedam parametara sa preciznošću do 10^{-15} , poboljšavši prethodni rezultat za dva reda veličine.

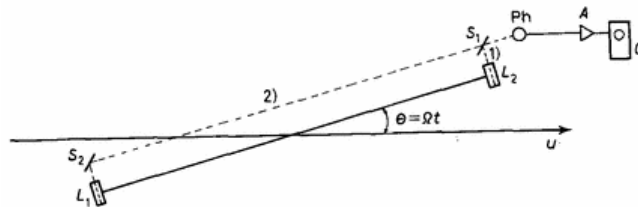


Slika 4.4: Shema eksperimenta izotropije prostora. Preuzeto iz [18]

4.4 Testovi izotropije korištenjem jednosmjernog prostiranja svjetlosti

Eksperimenti koji pomoću jednosmjernog prostiranja svjetlosti pokazuju izotropiju, ne mogu isključiti veliki broj teorija kod kojih je brzina svjetlosti u jednom smjeru anizotropna. Ove teorije imaju osobinu da je brzina povratne svjetlosti izotropna u bilo kojem intercijalnom sistemu, dok je kod jednosmjernog prostiranja svjetlosti brzina izotropna samo u okviru etera. Mjerena brzina u jednom smjeru zavisi od metode koja je korištena za sinhronizaciju satova [19].

R. Cialdea je 1972. izvijestio o eksperimentu u kojem je mjerio fazni pomak dvije laserske zrake, pomoću aparature koja je rotirana za ugao od 180° . U izvještaju navodi da nije zapažen pomak, te da je to dokaz konstantne brzine svjetlosti u dva okomita pravca [20]. Na slici 4.5 je prikazana postavka ovog eksperimenta. Eksperiment je izveden na sljedeći način. Nakon što se signal pojavio na ekranu osciloskopa, optička klupa se okretala oko vertikalne ose, konstantno se posmatrao interferencijski uzorak, ako dođe do bilo kakvih promjena. U slučaju kada bi prerelativistička teorija bila tačna, interferencijska slika bi se promijenila čim bi se aparatura počela okretati. S obzirom da se ništa nije događalo, to je vodilo na zaključak da je brzina svjetlosti konstantna i nezavisna od brzine sistema. Sličan eksperiment je izveo



Slika 4.5: Eksperimentalna postavka eksperimenta pomoću laserskih snopova, koji je dokazao konstantnu brzinu svjetlosti. S_1 je polurefleksno ogledalo, S_2 je potpuno reflektno ogledalo paralelno sa S_1 , Ph je fotodioda, A i O su pojačavač i osciloskop. Preuzeto iz [20]

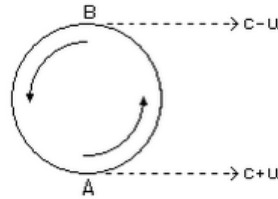
Timothy Krisher je 1990. godine pomoću dva vodikova masera fiksirana za Zemlju, koji su bili odvojeni pomoću 21km dugog fiber-optičkog vlakna, s ciljem traženja promjena u njihovim fazama. Ovaj eksperiment je postavio gornju granicu na jednosmjernu linearnu anizotropiju od 100m/s.

Godine 1974. K.C. Turner i H.A. Hill su objavili rezultate eksperimenta [21], koji je analogan Kennedy-Thorndikeom eksperimentu [14]. Korišten je Mössbauer efekat u Fe^{57} . To je efekat rezonancijske apsorpcije gama zračenja bez pomaka atomskih jezgri. Izvor Co^{57} se nalazio na obodu, a željezni

apsorber u blizini centra centrifuge. Frekventni pomak između rotirajućeg izvora i apsorbera je mjereno kao funkcija ugaone pozicije u odnosu na fiksne zvijezde. Ovim eksperimentom je postavljena gornja granica na bilo koju jednosmjernu anizotropiju na 10m/s.

4.5 Testovi brzine svjetlosti pomoću pokretnih izvora

Willem de Sitter 1913. godine [22] je opisao efekat, koji je po njemu nazvan efekat de Sitter. Taj efekat je korišten za podržavanje specijalne teorije relativnosti protiv emisione teorije Waltera Ritza iz 1908. godine, prema kojoj je Ritz postulirao promjenljivu brzinu svjetlosti. Prema Ritzovoj teoriji, kada se svjetlosni izvor kreće brzinom u u pozitivnom smjeru x ose, brzina svjetlosti emitovana u istom pravcu je $c + u$, gdje je c brzina svjetlosti emitovana od izvora koji miruje. Prema drugim teorijama, kao što je Einsteinova, brzina svjetlosti je uvijek konstanta i iznosi c , bez obzira na brzinu i kretanje izvora. Zamislamo binarnu zvijezdu i posmatrača u avionu na velikoj udalje-



Slika 4.6: Shematski prikaz emitovanja svjetlosti sa zvijezde u okolini tačaka A i B. Preuzeto iz [22]

nosti L . Svjetlost koju zvijezda emituje u blizini A, slika 4.6, prema Ritzovoj teoriji se opaža nakon vremena $\frac{L}{c+u}$, a ona emitovana u blizini tačke B nakon vremena $\frac{L}{c-u}$. Neka je T poluperiod orbite zvijezde, jednostavnosti radi neka je to krug. Tada je interval između ove dvije observacije:

$$\Delta = T + \frac{2Lu}{c^2 - u^2}$$

U slučaju $u \ll c$

$$\Delta = T + \frac{2Lu}{c^2}.$$

Testovi Einsteinovih postulata

Ako se u drugoj polovini perioda T zvijezda kreće od B do A, tada je na osnovu prethodnog izvođenja interval između observacija $T - \frac{2Lu}{c^2}$. Ako je $\frac{2Lu}{c^2}$ istog reda veličine kao T , te ako bi Ritzova teorija bila ispravna, observacije ne bi mogle biti u skladu sa Keplerovim zakonima kretanja. Postojanje spektroskopskih binarnih zvijezda, te De Sitterova istraživanja koja su pokazala da su sve proračunate orbite tih zvijezda u skladu sa Keplerovim zakonima, pokazuju da je brzina svjetlosti konstantna.

Poglavlje 5

Testovi dilatacije vremena i transverzalnog Dopplerovog efekta

5.1 Ives-Stilwell eksperiment

Godine 1938. Američki fizičar Herbert E. Ives (1882-1953) izveo je eksperiment koji je kasnije dobio naziv Ives-Stilwell eksperiment [23], po njegovom asistentu G.R. Stilwellu. Ovaj eksperiment pokazao je postojanje optičkog efekta koji odgovara tzv. transverzalnom Dopplerovom pomaku, tj. pomjeranju spektralnih linija u odnosu na klasični Dopplerov efekat, koji je Einstein izveo u svom radu iz 1905.godine [1]. Upravo ovo je razlog zašto se danas ovaj eksperiment navodi kao direktna potvrda specijalne teorije relativnosti, iako je Ives interpretirao ove rezultate kao dokaz Larmor-Lorentzove teorije. On nikada nije prihvatio specijalnu teoriju relativnosti, te je u periodu 1930-1950 godina u SAD-u bio veliki protivnik ove teorije. U periodu 1933-1953 objavio je više od 30 radova o relativnosti, čiji je cilj bio da pokaže da je specijalna teorija relativnosti zabluda, te da iznese alternativnu teoriju baziranu na postojanju stacionarnog etera i apsolutnog vremena. Ideja o eksperimentu je započela kada je Ives u jednom članku iznio argumente o potrebi da se izvrši eksperiment koji bi bio test dilatacije vremena. Ives se nije pozvao na specijalnu teoriju relativnosti, nego na Larmor-Lorentzovu teoriju. Prema Ivesu, ova teorija dobro opisuje promjene dužine i vremena, u zavisnosti od kretanja kroz stacionarni eter. Ako se objekat kreće kroz eter brzinom v , njegove longitudinalne dimenzije bi se promijenile prema Fitzgerald-Lorentzovoj formuli za kontrakciju. Veza između longitudinalne dužine objekta u kretanju

Testovi dilatacije vremena i transverznog Dopplerovog efekta

i u stacionarnom stanju je data sa:

$$L' = (1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}L, \quad (5.1)$$

gdje je L' longitudinalna dužina objekta u kretanju, L longitudinalna dužina objekta u mirovanju u odnosu na eter, te $\beta = \frac{v}{c}$ odnos brzine objekta u eteru i brzine svjetlosti u eteru. Promjene vremena, odgovaraju onome što je Ives nazvao Larmor-Lorentzova promjena frekvencije. Frekvencija sata u kretanju kroz eter bi se mijenjala prema:

$$\nu' = (1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}\nu, \quad (5.2)$$

gdje je ν' frekvencija sata u kretanju kroz eter, a ν frekvencija sata u stanju mirovanja. Ives-Stiwell eksperiment je zamišljen upravo da bi testirao prethodne jednačine.

U obje teorije, Einsteinovoj iz 1905. [1] i Lorentzovoj iz 1909. [24] se javlja isti matematički formalizam, tako da su empirijske posljedice u obje teorije iste. Ives je izveo ovaj eksperiment da bi odredio faktor promjene dužine iz jednačine (5.1).

Da bi se potvrdila dilatacija vremena bilo je potrebno mjeriti transverzalni Dopplerov efekat, koji nastaje kada je pravac kretanja izvora normalan na pravac prostiranja elektromagnetnih talasa. Ako bi transverzalni Dopplerov efekat bio registrovan, time bi eksperimentalno bila dokazana dilatacija vremena. Da bi se registrovao transverzalni Dopplerov efekat mora se vršiti detekcija svjetlosti koja je emitovana pod pravim uglom u odnosu na pravac kretanja pobuđenih atoma. Ako bi se vršila detekcija svjetlosti koja nije emitovana tačno pod pravim uglom, to više ne bi bio transverzalni Dopplerov efekat. S obzirom da je bilo jako teško razdvojiti zrake emitovane pod pravim uglom i one koje malo odstupaju od toga, Ives i Stilwell su mjerili longitudinalni Dopplerov efekat, te matematičkim postupkom povezali sa transverzalnim. Prikaz eksperimentalne postavke je na slici 5.1. Snop



Slika 5.1: Shema aparature korištene u Ives-Stilwellovom eksperimentu. Preuzeto iz [23]

Testovi dilatacije vremena i transverzalnog Dopplerovog efekta

jonizovanih atoma vodika (H_2^+), često nazvani kanalni zraci, generisan je pražnjenjem u Crooksovoj cijevi. Oni su ubrzavani razlikom potencijala od 6.788 do 18.350 V. Zrak i njegova reflektovana zraka su posmatrani pomoću konkavnog ogledala, postavljenog oko 7° od centra reflektovane zrake. Spektrograf je korišten da disperzije spektra iz kanala zraka na fotografsku ploču. Mjerni mikroskop je korišten za opažanje pomaka u Dopplerovom efektu. Da bi dobili veći pomak, poboljšani eksperiment je ponovljen 1941. godine. Eksperiment je poboljšan povećanjem potencijala između elektroda na više od 20.000 V. Usljed toga, postojala je mogućnost oštećenja cijevi, ali taj problem je riješen korištenjem više elektroda. Korištenjem sistema sa četiri elektrode, bilo je moguće postići potencijal od 43.000 V. Vrijednosti koje su dobivene u ova dva eksperimenta su predstavljene u tabeli ispod. Posljednjih godina postigla se jako velika preciznost u eksperimentima tipa ovog.

Predviđanja emisione teorije	Predviđanja STR	Opaženi rezultati
0.0202001	0.0202	0.0185
0.0243002	0.0243	0.0225
0.0280003	0.0280	0.0270
0.0360005	0.0360	0.0345
0.0478009	0.0478	0.0470
0.0670018	0.0670	0.0670
0.0686019	0.0686	0.0675
0.0724021	0.0724	0.0800
0.0869031	0.0869	0.0900
0.1054045	0.1054	0.1145

5.2 Mjerenja vremena života čestica

Dilatacija vremena se prema specijalnoj teoriji relativnosti, može potvrditi eksperimentima u kojima se mjeri vrijeme života čestica u sistemu u kojem miruju i u onom u kojem se kreću. Godine 1941. Bruno Rossi i D.B. Hall su relativistički mjerili raspad miona, za koje su tada smatrali da su mezoni. Razlog zašto su koristili ove čestice je taj što se oni kreću približno brzinom svjetlosti, $0.99c$. Rossi i Hall su potvrdili relativističke formule za impuls i dilataciju vremena. Oni su u svojim proračunima dobili da vrijeme života miona u stanju mirovanja iznosi $\approx 2.3 \pm 0.2 \mu s$ [25].

David Frisch i James Smith su 1963. godine ponovili eksperiment sa mionima. Prvo su mjerili broj miona koji se raspada u toku jednog sata na planini. Jedan broj miona će uspjeti da dodje do površine Zemlje na nivou mora i bude detektovan prije nego što se raspadne. Iz poznate visine na kojoj se mioni nalaze i njihove brzine, može se odrediti vrijeme koje je

Testovi dilatacije vremena i transverzalnog Dopplerovog efekta

potrebno da oni dođu do površine koja se nalazi na nivou mora. To vrijeme je iznosilo $6.3\mu\text{s}$. Prema ovim proračunima, samo 27 miona bi trebalo biti detektovano na površini Zemlje na nivou mora. Međutim, na nivou mora detektovano je 412 miona. To je vodilo na zaključak da mioni žive duže u sistemu u kojem miruju u odnosu na onaj u kojem se kreću. S obzirom da je za svaki raspadnuti mion na planini određivano vrijeme raspada i bilježeno na dijagram, pomoću broja miona koji su detektovani na nivou mora, moglo se odrediti njihovo vrijeme života u sistemu u kojem se kreću. Iz dobivenih podataka, to vrijeme je iznosilo $0.7\mu\text{s}$, a njihova brzina je $0.994c$ [26].

Nakon ovog eksperimenta u raznim akceleratorima su izvedena mnogo preciznija mjerenja, koristeći pored miona i druge čestice. Osim potvrde dilatacije vremena, potvrđena je i CPT simetrija, poređenjem vremena života pozitivnih i negativnih čestica. CPT simetrija zahtijeva da su stope raspada čestica i njihovih antičestica iste. Narušenje invarijantnosti CPT bi dovelo do narušenja Lorentz invarijantnosti, a samim tim i specijalne teorije relativnosti.

Godine 1952. R.P. Durbin, H.H. Loar i W.W. Havens su izvršili eksperiment sa pionima [27]. Vrijeme raspada π^+ i π^- mezona određeno je slabljenjem 73 MeV mezonskog snopa, koristeći scincilatorni brojač teleskop promjenljive dužine. Pretpostavili su da je shema raspada $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ izotropna u sistemu u kojem pion miruje. Rezultati koji su dobiveni za vrijeme raspada piona, kada se u obzir uzme dilatacija vremena su $(2.55 \pm 0.19)10^{-8}\text{s}$ i $(2.44 \pm 0.18)10^{-8}\text{s}$.

Još jedan eksperiment sa pionima su izveli A.J. Greenberg i njegovi saradnici 1969. godine. Vrijeme života nabijenog piona određeno je u toku leta. Rezultat koji su dobili je $(26.02 \pm 0.04)10^{-9}\text{s}$ [28].

Godine 1971. je izveden eksperiment u kojem je vrijeme života piona mjereno pomoću odnosa pozitivnih i negativnih piona [29].

Pregled eksperimenta za dokazivanje dilatacije vremena sa različitim vrstama čestica je dat sljedećom tabelom:

Pion	Kaon	Mion
Durbin (1952)	Burrowes (1959)	Lundy (1962)
Eckhause (1965)	Nordin (1961)	Meyer (1963)
Nordberg (1967)	Boyarski (1962)	Eckhause (1963)
Greenburg(1969)	Lobkowicz (1969)	Balandin (1974)
Ayres (1971)	Ott (1971)	
	Skjeggstad (1971)	
	Geweniger(1974)	
	Carithers (1975)	

5.3 Mjerenja Dopplerovog pomaka

Dopplerov efekat je pojava promjene talasne dužine, odnosno frekvencije izvora kada se detektor i izvor kreću relativno jedan u odnosu na drugi. Relativistički Dopplerov efekat uzima u obzir efekte opisane u STR. Kao posljedica relativističkog Dopplerovog efekta javlja se transverzalni Dopplerov efekat. Ovaj efekat postoji i kada se izvor i posmatrač kreću okomito jedan u odnosu na drugi. Ako kao pokretni izvor posmatramo zvijezdu, frekvencije ν' koja se kreće okomito na naš pravac posmatranja, detektor koji se nalazi na Zemlji mjerit će frekvenciju ν . Za transverzalni Dopplerov efekat dobit ćemo formulu:

$$\nu = \frac{\nu'}{\gamma}, \quad (5.3)$$

odnosno

$$\lambda = \gamma\lambda' \quad (5.4)$$

što predstavlja crveni pomak.

Mjerenjem Dopplerovog pomaka pomoću izvora koji se kreću približno brzinom svjetlosti c , potvrđuju se predviđanja specijalne teorije relativnosti.

Jedan od prvih eksperimenata mjerenja transverznog Dopplerovog efekta je eksperiment Walter Künidiga iz 1963. godine [30]. Korišten je ultrabrzi rotor i Mössbauer apsorber za mjerenje pomaka linije Fe^{57} kao funkcije ugaoone brzine ω u sistemu koji rotira. Apsorber je bio smješten 9.3cm od centra rotora, dok je izvor Co^{57} bio montiran na piezoelektričnu sondu u središtu rotora. Promjenom napona izvor se mogao kretati relativno prema apsorberu. Na ovaj način bilo je moguće posmatrati rezonantnu liniju pri različitim vrijednostima ω . Rezultati koji su dobiveni su se slagali sa specijalnom teorijom unutar 1.1%.

U godinama 1985. i 1993. izvedena su dva slična eksperimenta, gdje su upoređivane frekvencije sa prelazima u atomima neona. U eksperimentu iz 1985. godine Matti Kaivola dobio je slaganje sa specijalnom teorijom relativnosti u okviru 4×10^{-5} [31], a R.W. McGowan u eksperimentu iz 1993. godine 2.3×10^{-6} [32].

Hirsch I. Mandelberg i Louis Witten su 1962. godine izveli eksperiment [33] u kojem je mjereno Dopplerovo pomak $\sim (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-1/2}$, predviđen specijalnom teorijom relativnosti. Pokretni zrak, koji zrači atome vodika sa brzinama 2.8×10^8 je posmatran istovremeno u dolaznom i odlaznom smjeru. Usrednjavanjem mjerenja talasnih dužina određene spektralne linije za dva opažanja, daje vrijednost traženog pomaka. Član $1/2$ predviđen teorijom, može se uporediti sa dobivenim eksperimentalnim vrijednostima. Eksperimentom je dobivena vrijednost 0.498 ± 0.025 .

Poglavlje 6

Testovi relativističke kinematike

6.1 Elastični sudari

S obzirom da definicija četverovektora i pravila za operacije s njima, nisu definisani za neki određen sistem referencije, to znači da važe u svim sistemima referencije. Svi četverovektori se pri Lorentzovim transformacijama mijenjaju na isti način. To znači da će relacije napisane preko skalara i četverovektora biti takve da će se i lijeva i desna strana jednakosti mijenjati na isti način pri Lorentzovim transformacijama, pa će takve relacije (zakoni) biti Lorentz invarijantne. To je od velike važnosti, jer ako zakone mehanike formulišemo preko njih, oni će imati isti oblik u svim inercijalnim sistemima. Stoga ćemo u ovom poglavlju raditi sa četverovektorima.

U razmatranju elastičnih sudara primjenjuju se zakoni očuvanja energije i impulsa. Ova dva zakona možemo objediniti u zakon očuvanja četveroimpulsa koji je definisan sa [34]:

$$p^\mu = m\eta^\mu, \quad (6.1)$$

gdje je $\eta = \gamma v$. Prostorne komponente četverovektora impulsa p^μ odgovaraju relativističkom impulsu:

$$\mathbf{P} \equiv \gamma m \mathbf{v} = \frac{m \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (6.2)$$

Nulta komponenta je:

$$p^0 = \gamma mc \quad (6.3)$$

Sada, možemo definisati relativističku energiju kao:

$$E \equiv \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (6.4)$$

Tada nultu komponentu p^μ možemo izraziti kao E/c . Tako, energija i impuls zajedno čine četverovektor:

$$p^\mu = (E/c, p_x, p_y, p_z). \quad (6.5)$$

Pomoću četverovektora možemo pisati:

$$p_\mu p^\mu = \frac{E^2}{c^2} - (\mathbf{P})^2 = m^2 c^2. \quad (6.6)$$

U slučaju $v \ll c$, izraz za relativistički impuls se svodi na klasični izraz za impuls. Za relativističku energiju ne možemo reći isto. Izraz za energiju ćemo razviti u Taylorov red:

$$E = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right) = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 + \frac{3}{8} m \frac{v^4}{c^2} + \dots \quad (6.7)$$

Možemo primijetiti da je član mc^2 konstantan, dok drugi član odgovara klasičnom izrazu za kinetičku energiju. Ako zanemarimo članove višeg reda, za $v \ll c$, izraz za kinetičku energiju će se svesi na onaj u klasičnom slučaju. Konstantni član, koji preživljava čak i za $v = 0$ se naziva energija mirovanja. U klasičnoj mehanici pojam bezmasene čestice nije moguć, jer bi u tom slučaju impuls bio nula, kao i kinetička energija. U relativističkoj fizici situacija je drugačija. Ako pažljivo ispitamo formule:

$$\mathbf{P} = \gamma m \mathbf{v}, E = \gamma mc^2 \quad (6.8)$$

vidimo da u slučaju $m = 0$ brojnik iščezava, ali za $v = c$ nazivnik iščezava, što bi značilo da su ove jednačine neodređene. Ovo znači da prethodne jednačine ne mogu služiti za definisanje E i p . Ipak, za bezmasene čestice pomoću (6.6) vrijedi:

$$v = c, E = |\mathbf{P}|c. \quad (6.9)$$

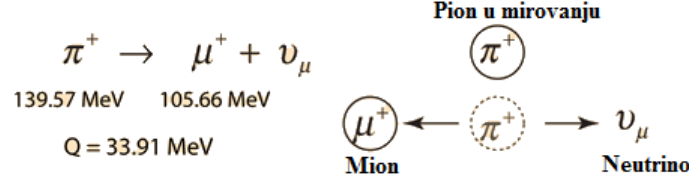
Sada ćemo navesti primjer raspada piona na mion i neutrino prikazan na slici 6.1, u kojem ćemo izraziti energije produkata raspada i brzinu miona preko masa čestica koje učestvuju u interakciji. To ćemo učiniti primjenom zakona očuvanja energije i impulsa. Prema zakonu očuvanja impulsa:

$$\mathbf{p}_\pi = \mathbf{p}_\mu + \mathbf{p}_\nu. \quad (6.10)$$

S obzirom da pion miruje njegov impuls je jednak nuli, $\mathbf{p}_\pi = 0$. Iz ovoga slijedi ¹

$$\mathbf{p}_\mu = -\mathbf{p}_\nu, \quad (6.11)$$

¹Indeksi μ i ν su oznake za mion i neutrino, a ne grčki indeksi koji označavaju komponente četverovektora.



Slika 6.1: Raspad piona na mion i neutrino

odnosno,

$$|\mathbf{p}_\mu| = |\mathbf{p}_\nu| \quad (6.12)$$

Prema zakonu očuvanja energije

$$E_\pi = E_\mu + E_\nu. \quad (6.13)$$

Energija piona koji miruje je

$$E_\pi = m_\pi c^2.$$

U standardnom modelu $m_\nu \approx 0$, stoga je energija neutrina $E_\nu \approx \nu c$. Prema relativističkom izrazu za energiju, energija miona je $E_\mu = \sqrt{m_\mu^2 c^4 + (\mathbf{p})_\mu^2 c^2}$.

Ukupna energija je suma kinetičke energije i energije mirovanja, $E = T + mc^2$. Iz jednačine (6.13) slijedi:

$$m_\pi c^2 = \sqrt{m_\mu^2 c^4 + p_\mu^2 c^2} + p_\nu c$$

Prebacivanjem člana $p_\nu c$ na drugu stranu, kvadriranjem iste, te korištenjem uslova (6.12), za impuls neutrina (miona) se dobiva:

$$p_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} c. \quad (6.14)$$

Sada možemo odrediti izraze za kinetičke energije produkata raspada. Kinetička energija neutrina je:

$$T_\nu = E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} c^2. \quad (6.15)$$

Pomoću relacije (6.11) i izraza $T_\mu = E_\mu - m_\mu c^2$, za kinetičku energiju miona dobivamo:

$$T_\mu = \frac{m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi m_\mu}{2m_\pi} c^2. \quad (6.16)$$

Na kraju, brzinu miona dobivamo iz izraza za relativistički impuls, $p_\mu = \frac{m_\mu v_\mu}{\sqrt{1 - \frac{v_\mu^2}{c^2}}}$. Uvrštavanjem prethodno dobivenih relacija i izražavanjem brzine slijedi:

$$v_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 + m_\mu^2} c. \quad (6.17)$$

Sudari su procesi koji se dešavaju jako brzo, tako da utjecaji vanjskih sila, kao što je gravitacija ili sila trenja, nisu mjerljivi. U klasičnom slučaju masa i impuls su uvijek očuvani u takvim procesima, dok kinetička energija može, ali i ne mora da bude očuvana. U relativističkim sudarima energija i impuls su uvijek očuvani. Drugim riječima, sve četiri komponente četverovektora energija-impuls su očuvane. Kao i u klasičnom slučaju, kinetička energija može, ali i ne mora da bude očuvana, dok je u slučaju elastičnih sudara, kinetička energija očuvana. Prilikom sudara čestica sa drugim česticama ili antičesticama, nastaju različite kombinacije novih čestica. Širom svijeta postoje mnogobrojne laboratorije za ispitivanje ovih procesa. To je jedan od najvažnijih problema kojima se bavi moderna fizika. Jedna od najpoznatijih laboratorija za ispitivanje elementarnih čestica je Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory). Tamo se nalazi Tevraton, koji je bio drugi najveći akcelerator na svijetu prije prestanka rada 2011. godine. Ovaj akcelerator je korišten pri otkriću top kvarka 1995. godine.

Pored ovog laboratorija, neophodno je spomenuti CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) laboratorij. U ovoj laboratoriji koriste neke od najvećih i najsloženijih naučnih instrumenata za proučavanje elementarnih čestica. Prilikom sudara čestica postižu se brzine jako bliske brzini svjetlosti. Na ovaj način omogućava se uvid u temeljne zakone prirode. Na CERN-u je smješten najveći i najsnažniji akcelerator na svijetu, LHC (Large Hadron Collider). Snopovi čestica se sudaraju na četiri lokacije akceleratora, što odgovara položajima četiri čestična detektora ATLAS, CMS, ALICE i LHCb. Pomoću ovog akceleratora dokazano je postojanje Higgsovog bozona.

Prilikom raspršenja oblika $A + B \rightarrow C + D$ pogodno je koristiti tzv. Mandelstamove varijable

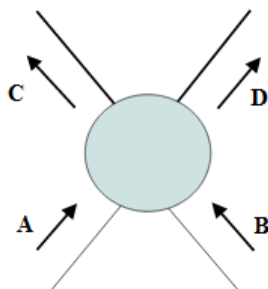
$$s = (p_A + p_B)^2, \quad (6.18)$$

$$p = (p_A + p_C)^2, \quad (6.19)$$

$$u = (p_A - p_D)^2, \quad (6.20)$$

gdje su p četverovektori impulsa. Značenje ovih varijabi je sljedeće: s je energija čestica A i B u sistemu centra masa (ujedno i energija centra masa čestica C i D, jer važi zakon očuvanja četveroimpulsa), t govori o transferu impulsa sa čestice A na česticu C, a u o transferu impulsa sa čestice A na

česticu D. Mandelstamove varijable s , t i u su Lorentz invarijantne veličine.



Slika 6.2: Sudar dvije ulazne čestice sa dvije izlazne čestice

Može se pokazati da je zbir Mandelstamovih varijabli jednak zbiru kvadrata masa svih ulaznih i izlaznih čestica, tj:

$$s + u + t = m_A^2 + m_B^2 + m_C^2 + m_D^2. \quad (6.21)$$

6.2 Eksperimenti ograničene brzine svjetlosti

Eksperimenti u kojima se mjerila brzina neutrina su sprovedni kao testovi specijalne teorije relativnosti, te su korišteni za određivanje mase neutrina. Istraživanje se sastojalo u ispitivanju da li svjetlost i neutriini, koji su emitovani istovremeno iz udaljenih izvora, stižu istovremeno na Zemlju. S obzirom da je potvrđeno da neutriini imaju masu, njihova brzina bi trebala biti nešto manja od brzine svjetlosti u skladu sa specijalnom teorijom relativnosti.

Dugo vremena se u okviru standardnog modela fizike smatralo da neutriini nemaju masu [35]. To bi značilo da se oni kreću tačno brzinom svjetlosti. Nakon otkrića neutronske oscilacije, pretpostavilo se da oni ipak imaju neku masu. Zbog toga, neutriini bi se trebali kretati brzinom nešto manjom od brzine svjetlosti. Masa neutrina još uvijek nije tačno izmjerena, ali se pretpostavlja da je < 0.2 eV. Prema formuli za relativističku energiju i pretpostavljenoj masi neutrina, relativna razlika u brzini svjetlosti i brzini neutrina bi trebala biti manja na visokim energijama. Do sada su istraživanja vršena sa neutrinima energije iznad 10 MeV. Problem je što se razlika u brzinama predviđena specijalnom teorijom na tako visokim energijama ne može utvrditi dovoljno precizno sa trenutnom preciznošću mjerenja vremena. Pri određenim uslovima, može doći do značajnog odstupanja od brzine svjetlosti. Postoji veliki broj eksperimenata u kojima je mjerena brzina neutrina, a svi su oni potvrdili Lorentz invarijantnost i specijalnu teoriju

relativnosti. U nastavku će biti spomenuti neki od najznačajnijih mjerenja relativne razlike brzine svjetlosti i neutrina. U Fermilab-u 70-ih godina je izveden niz mjerenja u kojima se poredila brzina miona sa brzinom neutrina [36] i antineutrina [37] sa energijama između 30 i 200 GeV. Dobivena gornja granica odstupanja od brzine svjetlosti je iznosila: $\frac{|v-c|}{c} < 4 \times 10^{-5}$.

Godine 1987. par sati prije nego što je vidljiva svjetlost iz Supernove 1987A stigla do Zemlje, uočen je niz neutrina u tri odvojena opservatorija. To se javlja zbog emisije neutrina, koja se javlja istovremeno sa kolapsom jezgre, a prethodi emisiji vidljive svjetlosti. Ovaj događaj je značajan jer je to prvi put da su se neutriini emitovani iz supernove direktno opažali. To je značilo početak astronomije neutrina. Zapažanja su bila u skladu sa teorijskim modelima supernovih, gdje se 99% energije kolapsa izrači u obliku neutrina. Ova istraživanja su postavila gornju granicu na masu i naboj neutrina, kao i broj "okusa". Za relativnu brzinu neutrina u odnosu na brzinu svjetlosti je dobiveno: $\frac{|v-c|}{c} < 2 \times 10^{-9}$ [38][39][40][41].

Godine 2011. u OPERA eksperimentu, izvedenom na CERN-u, greškom je opažena brzina neutrina veća od brzine svjetlosti [42]. Rezultat je odmah smatran anomalijom, zato što bi to otkriće kršilo specijalnu teoriju, koja je godinama bila temelj na kome je građena moderna fizika. Nakon objavljivanja rezultata, tim koji je radio na ovom eksperimentu je prijavio dvije greške prilikom izvođenja eksperimenta: fiber optički kabal je bio nepravilno namješten, te problem sa oscilatorom koji je utjecao na sinhronizaciju GPS-a. Naredne godine tim naučnika koji je radio na ovom eksperimentu je dao novu analizu rezultata. Rezultati su dali $\frac{|v-c|}{c} < (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-6}$ [43].

Malo prije nego što je tim naučnika OPERA eksperimenta objavio reanalizu rezultata, ICARUS tim naučnika je objavio mjerenja brzine neutrina. Na osnovu sedam snimljenih neutrinskih događaja, rezultat $\delta t = (0.3 \pm 4.9(stat.) \pm 0.9(syst.))ns$, je u skladu sa brzinom propagacije neutrina u odnosu na brzinu svjetlosti [44]. Modernijim eksperimentima može se indirektno odrediti odstupanje između brzine neutrina i brzine svjetlosti, mjerenjem energije neutrina i stopom raspada drugih čestica na velikim udaljenostima. Na ovaj način moguće je dobiti još striktnije granice.

Poglavlje 7

Indirektne potvrde STR

Iako nije eksperiment, niti bilo kakva vrsta testa STR, GPS (Global Positioning System) je jako koristan sistem u kojem relativnost ima jako bitnu ulogu. GPS se sastoji od tri segmenta: svemirski, kontrolni i korisnički. Svemirski sistem je baziran na 24 satelita koji kruže oko Zemlje, svaki noseći precizan atomski sat. Kontrolni segment sastoji se od sistema za praćenje stanica širom svijeta. Korisnički segment sastoji se od GPS prijemnika i zajednice korisnika. GPS prijemnici pretvaraju dobivene signale u procjene položaja, brzine i vremena. Potrebna su četiri satelita za određivanje četiri dimenzije, prostor i vrijeme. Ovi prijemnici se koriste za navigaciju, pozicioniranje, naučna istraživanja i mnoge druge svrhe.

Da bi se precizno odredio položaj potrebno je što tačnije odrediti rastojanje između satelita i prijemnika. Sateliti emituju kodirane mikrotalasne signale i rastojanje od satelita do prijemnika se mjeri tako što se na prijemniku određuje vrijeme dolaska signala sa svakog satelita. Pošto se mikrotalasi kreću brzinom svjetlosti, ukoliko je poznato vrijeme njihovog putovanja t , lako se određuje i put koji prelaze. Trenutak slanja talasa se određuje vrlo preciznim cezijumskim satom, čija je preciznost 5ns na dan i to odstupanje se lako može otkloniti.

Kada ne bi u obzir uzimali relativističke efekte greška bi bila mnogo veća. Satovi u satelitima koji kruže po orbitama iznad Zemlje se kreću mnogo brže od satova koji se nalaze na Zemlji. Prema Einsteinovog specijalnoj teoriji relativnosti vrijeme za satove u satelitima teče sporije u odnosu na Zemlju, te je njihovo kašnjenje oko $7.2\mu s$ na dan. Također, satovi u satelitima se nalaze 20000km iznad Zemlje, te osjete slabiju gravitaciju nego na Zemlji. Prema Einsteinovoj općoj teoriji gravitacije, zakrivljenost prostora i vremena rezultira tim da satovi na orbitama idu brže nego oni na Zemlji, za oko $45\mu s$ dnevno. Zajedno sa svim relativističkim efektima satovi na satelitima žure oko $38\mu s$ dnevno, što odgovara udaljenosti, koju svjetlost prelazi, od

oko 10km.

GPS prijemnik koristi vrijeme, u kojem je signal sa svakog satelita emitovan, određeno atomskim satom, te zajedno sa brzinom svjetlosti određuje položaj između sebe i određenog satelita. Orbita svakog satelita je precizno određena. Sa dovoljnim brojem satelita, određivanje tačnog položaja i vremena postaje jednostavan problem Euklidske geometrije. Uračunavanje relativističkih efekata se vrši elektronskim podešavanjem satova na satelitu, te ubacivanjem (matematičkih) korekcija u kompjuterske čipove korisnika.

Poglavlje 8

Zaključak

Ideja ovog rada bila je da se da historijski pregled razvoja specijalne teorije relativnosti, te analiziraju eksperimenti koji su potvrdili ovu teoriju. Nakon uvoda u STR, obrađeni su postulati STR te posljedice tih postulata: istovremenost događaja, dilatacija vremena i kontrakcija dužine. U istom poglavlju obrađene su Lorentzove transformacije, te njihove posljedice: kontrakcija dužine, dilatacija vremena i transformacija brzina.

Prvi eksperimenti koji su predstavljeni u radu, Fizeauov i Michelson-Morleyev eksperiment, su značajni iz razloga što su prvobitno izvedeni s ciljem potvrđivanja postojanja etera, ali su njihovi rezultati bili u saglasnosti sa STR. Upravo to je rezultiralo mnogobrojnim ponavljanjima Michelson-Morleyevog eksperimenta i varijacijama istog. Stoga je čitavo jedno poglavlje posvećeno tim eksperimentima, jer su rezultati svih tih eksperimenata bili u skladu sa STR.

Nakon eksperimenata koji su testirali Einsteinove postulate, obrađivani su eksperimenti koji su potvrdili dilataciju vremena, kao što je mjerenje života čestica u sistemu u kojem čestice miruju i u sistemu u kojem se kreću. U ovom poglavlju je napravljen kratak pregled eksperimenata koji su potvrdili transverzalni Dopplerov efekat, čije je postojanje predviđeno specijalnom teorijom relativnosti.

U poglavlju relativistička kinematika je opisana primjena zakona očuvanja impulsa i energije u okviru specijalne teorije relativnosti, te zakon očuvanja četveroimpulsa. U modernoj fizici, jako su značajna rasijanja čestica, a svi eksperimenti rasijanja čestica koji se izvode u mnogim akceleratorima pokazali su da se prilikom sudara čestica njihov impuls i energija mijenjaju u skladu sa specijalnom teorijom relativnosti. U drugom dijelu ovog poglavlja napravljen je pregled eksperimenata gdje se mjerila brzina neutrina. Svi ovi eksperimentni su pokazali da je brzina svjetlosti maksimalna moguća brzina, što je u skladu sa STR.

Posljednje poglavlje se bavi GPS sistemom, koji indirektno potvrđuje STR. To predstavlja primjenu STR u svakodnevnom životu, jer GPS sistem uračunava sve relativističke efekte. S obzirom da je primjena GPS sistema mnogobrojna, počevši od vojne upotrebe, naučnih istraživanja ili svakodnevnog života, možemo reći da STR indirektno utječe na život na Zemlji, iako se njeni efekti ne osjećaju direktno.

Na kraju možemo zaključiti da je specijalna teorija relativnosti zasigurno teorija koja je imala najveći broj eksperimentalnih provjera u historiji moderne nauke. Većina eksperimenata koji su izvedeni imali su za cilj opovrgavanje ove teorije, a negativni rezultati ovih eksperimenata samo su potvrđivali njenu ispravnost.

Bibliografija

- [1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik **17**, (1905).
- [2] National Institute of Standards and Technology, www.nist.gov
- [3] M.H. Fizeau, *Sur les hypotheses relatives a l'ether lumineux*, Annales de chimie et de physique, 3e ser., **T.57**, 385, (1859).
- [4] A.A. Michelson and E.W. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, Americal Jorunal of Science (3rd series) **34**, 333–345 (1887).
- [5] *Conference on the Michelson-Morley experiment* The Astrophysics Journal **68**, (1928).
- [6] A.A. Michelson and H. Gale, *The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light, II*, Nature **115** 566. (1925); Astrophys. J. **61** 137, (1925).
- [7] D. Miller, *The Ether-Drift Experiments and the Determination of the Absolute Motion of the Earth*, Rev. Mod. Phys. **5**, 203, (1933).
- [8] A.A. Michelson, F.G.Pease, F. Pearson, *Repetition of the Michelson-Morley Experiment*, Nature **123**, 88, (1929).
- [9] R.S. Shankland, S.W. McCuskey, F.C. Leone, and, G. Kuerti, *New analysis of the interferometric observations of Dayton C. Miller*, Reviews in Modern Physics **27**, 167–178 (1955).
- [10] Thomas J. Roberts, *An Explanation of Dayton Miller's Anomalous "Ether Drift" Result*, Illinois Institute of Technology, Chicago, IL. and Muons, Inc., Batavia IL (2006).
- [11] G. Joos, *Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs*, Ann. Phys. **7**, 385, (1930).

-
- [12] K.K. Illingworth, *A Repetition of the Michelson-Morley Experiment Using Kennedy's Refinement*, Phys. Rev. **30**, 692, (1927).
- [13] J. Shamir and R. Fox, *A new experimental test of special relativity*, N. Cim. B **62** no. 2, 258, (1969).
- [14] R.J. Kennedy and E.M. Thorndike, *Experimental Establishment of the Relativity of Time*, Phys. Rev. **42**, 400–418, (1932).
- [15] J. Müller and M. Soffel, *A Kennedy-Thorndike experiment using LLR data*, Phys. Lett. A **198**, 71, (1995).
- [16] A. Brillet and J.L. Hall, *Improved Laser Test of the Isotropy of Space*, Phys. Rev. Lett. **42**, 549–552 (1979).
- [17] T.S. Jaseja, A. Javan, J. Murray and C.H. Townes, *Test of Special Relativity or of the Isotropy of Space by Use of Infrared Masers*, Phys. Rev. A **133**, 1221–1225 (1964).
- [18] H. Müller et al., *Modern Michelson-Morley Experiment using Cryogenic Optical Resonators*, Phys. Rev. Lett. **91**, 020401 (2003).
- [19] Y.Z. Zhang, *Special Relativity and Its Experimental Foundation*, Advanced Series on Theoretical Physical Science **4**, World Scientific Pub. Co, Ltd., Singapore, (1999).
- [20] R. Cialdea, *A New Test of the Second Postulate of Special Relativity Sensitive to First-Order Effects*, Lett. Nuovo Cimento **4**, 821, (1972).
- [21] K. C. Turner and H. A. Hill, *New Experimental Limit on Velocity-Dependent Interactions of Clocks and Distant Matter*, Phys. Rev. **134**, B252, (1964).
- [22] W. de Sitter, *Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*, Physik. Zeitschr. **14**, 429, (1913).
- [23] H.E. Ives and G.R. Stilwell, *An Experimental Study of the Rate of a Moving Atomic Clock*, J. Opt. Soc. Am. **28**, 215–226 (1938); JOSA **31**, 369–374 (1941).
- [24] H.A. Lorentz, *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat; a course of lectures delivered in Columbia university, New York, in March and April 1906*, New York, Columbia University Press (1909/16).

BIBLIOGRAFIJA

- [25] B. Rossi and D.B. Hall, *Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum*, Phys. Rev. **59**, 223–228, (1941).
- [26] D.H. Frisch and J.H. Smith, *Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ Mesons*, Am. J. Phys. **31**, 342–355, (1963).
- [27] R.P. Durbin, H.H. Loar and W.W. Havens, *The Lifetimes of the π^+ and π^- Mesons*, Physical Review **88**, 179, (1952).
- [28] A.J. Greenberg et al., *Charged-Pion Lifetime and a Limit on a Fundamental Length*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1267–1270, (1969).
- [29] D.S. Ayres et al., *Measurements of the Lifetimes of Positive and Negative Pions*, Phys. Rev. **3**, 1051–1063, (1971).
- [30] W. Kündig, *Measurement of the Transverse Doppler Effect in an Accelerated System*, Phys. Rev. **129** no. 6, 2371, (1963).
- [31] M. Kaivola, *Measurement of the Relativistic Doppler Shift in Neon*, Phys. Rev. Lett. **54**, 255, (1985).
- [32] R.W. McGowan, *New Measurement of the Relativistic Doppler Shift in Neon*, Phys. Rev. Lett. **70**, 251, (1993).
- [33] H.I. Mandelberg and L. Witten, *Experimental Verification of the Relativistic Doppler Effect*, J. Opt.Soc.Am. **52**, 529-535, (1962).
- [34] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles (2nd ed.)*, Wiley-VCH, (2008).
- [35] J. Beringer et al., *Neutrino Properties - Review of Particle Physics*, Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012).
- [36] P. Alspector et al., *Experimental Comparison of Neutrino and Muon Velocities*, Phys. Rev. Lett., **36**, 837–840, (1976).
- [37] G. Kalbfleisch et al., *Experimental Comparison of Neutrino, Antineutrino, and Muon Velocities*, Phys. Rev. Lett., **43**, 1361–1364, (1979).
- [38] K. Hirata et al., *Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A*, Phys. Rev. Lett., **58**, 1490–1493, (1987).
- [39] R.M. Bionta et al., *Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud*, Phys. Rev. Lett., **58**, 1494–1496, (1987).

BIBLIOGRAFIJA

- [40] M.J. Longo, *Tests of relativity from SN1987A*, Phys. Rev. D, **236**,3276–3277, (1987).
- [41] L. Stodolsky, *The speed of light and the speed of neutrinos*, Phys. Let. B, **201**,353–354, (1988).
- [42] OPERA collaboration, *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam*, (2011).
- [43] OPERA collaboration, *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam*, JHEP, **2012**, 93, (2012).
- [44] ICARUS collaboration, *Measurement of the neutrino velocity with the ICARUS detector at the CNGS beam*, Phys. Let. B, **713**, 17–22, (2012).