



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

14 HOB 2007
0603 9/1546

Najvažniji testovi specijalne teorije relativnosti pre Drugog svetskog rata

Mentor:

dr Milica Pavkov - Hrvojević

Kandidat:

Ivana Mezei

Novi Sad, 2007.

Sadržaj

Uvod	2
1. Etar	4
1.1 Zvezdana aberacija i stacionaran etar	4
1.2 Frenelov koeficijent	7
2. Majkelsonov eksperiment	11
2.1 Majkelson - Morljev eksperiment	15
3. Kenedi - Torndajk eksperiment	19
3.1 Rezultati	23
4. Eksperiment Iva i Stilvela	25
4.1 Postavka eksperimenta	27
Zaključak	28
Literatura	29
Kratka biografija	30
Ključna dokumentacijska informacija	31

Uvod:

Princip relativnosti uveo je još Galilej, na osnovu starih Aristotelovih zapisa. Galilej je smatrao da kretanje, ili bar uniformno pravolinjsko kretanje, jedino ima smisla ukoliko se posmatra relativno u odnosu na neko drugo kretanje, i da ne postoji absolutni inercijalni sistem. Galilej je takođe izveo set transformacija koje se danas nazivaju Galiljeve transformacije. Nasuprot tome, pojavila se Njutnova teorija koja je ujedno bila i prva fizička teorija. Dakle, Njutnova klasična mehanika zasnivala se na predstavama o svojstvu prostora, vremena i mehaničkog kretanja. To su bile predstave o absolutnom prostoru i absolutnom vremenu, absolutnom sistemu reference i absolutnoj istovremenosti događaja. Princip relativnosti pokazao se kao validan za svakodnevne fenomene koji su uključivali čvrsta tela, ali za svetlost je i dalje bilo problematično objašnjenje.

U ranim godinama 19. veka poklanja se veća pažnja proučavanju svetlosti, elektriciteta i magnetizma. Javljuju se ideje o magnetnom i električnom polju, kao i o njihovoj međusobnoj povezanosti. Maksvelove jednačine upravo daju uvid o povezanosti električnog i magnetnog polja, odnosno promene u električnom polju prouzrokuju promene u magnetnom polju i obrnuto. Na osnovu toga zaključeno je da se elektromagnetni talasi prostiru tačno određenom brzinom, koju je Maksvel izračunao i ona iznosi $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$. Ispostavlja se da ova brzina odgovara brzini svetlosti. Međutim, nije bilo jasno u odnosu na koju sredinu ta brzina ima upravo datu vrednost. Bilo je neophodno obezbediti neku hipotetičku sredinu, medijum, za prenošenje elektromagnetnih talasa. Takva sredina nazvana je etar. Hipoteza etra se potpuno uklapala u Njutnovu teoriju, ali je sa eksperimentalne tačke gledišta naišla na neuspeh. Naime, prvi eksperiment koji je bio urađen da bi se identifikovao absolutni (nepokretni) sistem reference, dao je negativan rezultat. Takav, potpuno neočekivani rezultat bio je da ne postoji nikakva razlika u brzinama prostiranja svetlosti. Jednostavna interpretacija eksperimenta je bila da je brzina svetlosti uvek ista za sve pravce propagacije u svakom inercijalnom sistemu.

Eksperimentalna činjenica da je brzina svetlosti uvek ista u svim inercijalnim sistemima, suočila je fiziku sa početka dvadesetog veka sa svojevrsnim paradoksom. Javila se potreba za uvođenjem preciznije teorije prostora i vremena, ta teorija koja je nastala 1905. godine nazvana je Specijalna teorija relativnosti (STR). Njen tvorac bio je Albert Ajnštajn (Albert Einstein 1879-1955) koji je u delu " Elektrodinamika pokretnih tela " ("Zur Elektrodynamik bewegter Körper") dao uopštenje osnovnih predstava njutnovske mehanike na oblasti velikih brzina. U osnovi STR nalaze se dva fundamentalna stava, koja su nazvana *postulati specijalne teorije relativnosti*. Oni glase:

1. Zakoni fizike su isti u svim inercijalnim sistemima reference. Ne postoji izdvojeni privilegovani inercijalni sistem reference (*Princip relativnosti*).
2. Brzina svetlosti u vakuumu ima istu vrednost c u svim inercijalnim sistemima reference, nazavisno od relativnog kretanja izvora i posmatrača (*Princip konstantnosti brzine svetlosti*).

Na osnovu ovih postulata proizilaze određene predstave, odnosno posledice, o tome da ne postoji absolutni sistem reference i da absolutna istovremenost nema smisla. Postoji relativnost istovremenosti a takođe i relativnost vremenskih intervala i dužina. Proširenje principa relativnosti na ubrzane sisteme reference dovodi do formulacije principa

ekvivalencije gravitacije i inercije. 1915. godine Ajnštajn objavljuje Opštu teoriju relativnosti (OTR).

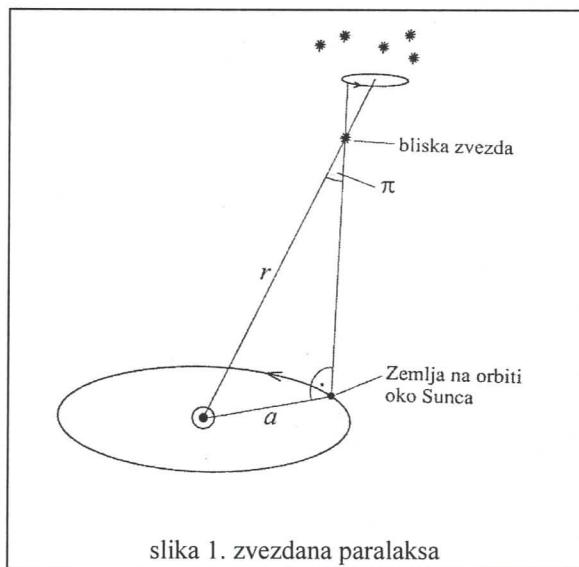
Eksperimenti koji su doveli do razvoja i potvrde specijalne teorije relativnosti su: Majkelson - Morli, Kenedi - Torndajk i Iv - Stilvel eksperimenti. To su bili prvi eksperimenti STR i zbog svoje važnosti opširnije su opisani u nekoliko narednih poglavlja. Nema potrebe nabrajati sve eksperimente koji su urađeni do današnjeg dana, a išli su u prilog specijalnoj teoriji relativnosti. Jedino se može s pravom reći da je mnoštvo eksperimentalnog iskustva potvrdilo teoriju u tolikom opsegu, da se ne može ni posumnjati u validnost STR.

1. Etar

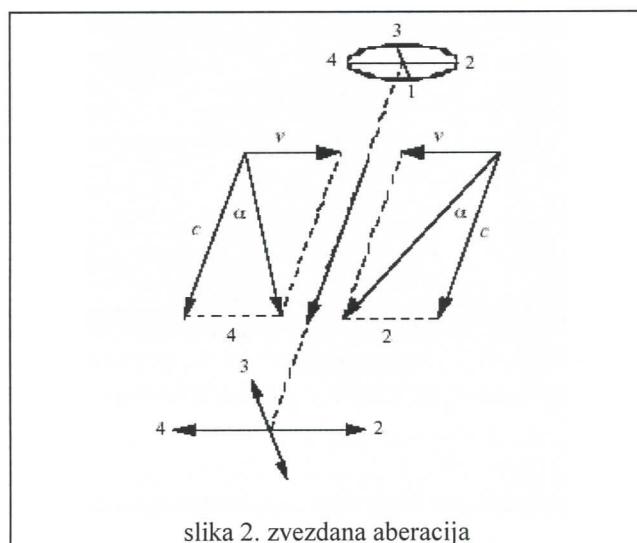
Fizičari su od davnina pokušavali da odgonetnu problem prostora i vremena, da svakom događaju u prirodi odrede mesto i vreme da bi ga kasnije mogli opet pronaći u prostornom i vremenskom poretku. Činjenica da se kroz prostor širi svetlost, kao i magnetne i električne sile dovela je do hipoteze da prostor nije prazan. Naučnici koji su radili na talasnoj teoriji svetlosti u 19. veku, zaključili su da mora postojati medijum koji bi prenosio svetlosne talase. Ovaj medijum je nazvan *etar* - hipotetička sredina nulte gustine i potpune prozračnosti. Osnovno pitanje koje se postavljalo u to vreme bilo je da li se etar nalazi u stanju mirovanja ili kretanja. Postojala su dva odgovora : (1) etar je potpuno nepokretan iako se materija kreće kroz njega – *stacionaran ili imobilan etar* ; (2) materija se povlači zajedno sa etrom – *teorija povlačenja etra*. Zvezdana aberacija predstavlja dokaz za prvu opciju, a polarizacija za drugu. U narednih nekoliko pasusa biće objašnjeni ovi dokazi kao i argumenti za i protiv istih.

1.1 Zvezdana aberacija i stacionaran etar

Fenomen zvezdane aberacije je otkrio 1720. godine Bredli (Jamesa Bradley, 1692.-1762.), koji je htio da odredi zvezdanu paralaksu. Zbog promene položaja Zemlje tokom godine pravac u kome se sa Zemlje vidi neka bliska zvezda se menja. Tako dobijena mala orbita u stvari je projekcija Zemljine orbite na nebeskoj sferi, a paralaksa je najveći ugao pod kojim bi se sa zvezde video radijus Zemljine orbite normalno na pravac Zemlja – zvezda (slika 1.). Čak i za najbliže zvezde ugao je jako mali tako da se paralaksa nije mogla izmeriti sve do 1830. godine (Besel).



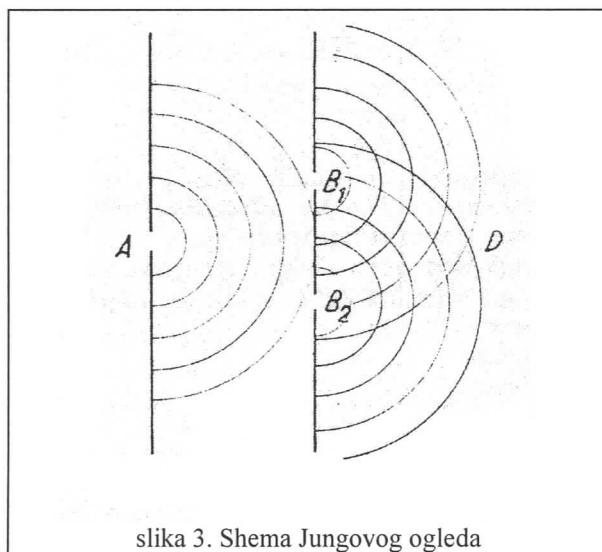
Međutim Bredli je ustanovio sistematičnu varijaciju prividnog položaja zvezda, koja je, kako je on mislio, prouzrokovana promenom brzine pre nego promenom položaja Zemlje tokom godine. Prema Bredliju fenomen zvezdane aberacije je vrlo jednostavan. Zasniva se na posmatranju sezonske promene prividnog položaja zvezde. Poznato je iz astronomije da se pod aberacijom svetlosti zvezde podrazumeva pojava da se zvezda ne nalazi tačno u onom pravcu u kome je vidi posmatrač na Zemlji, jer je to prividni pravac, koji je nastao usled Zemljinog kretanja oko Sunca, tako da sa pravcem u kome se stvarno prostiru svetlosni zraci od zvezde prema posmatraču gradi izvestan ugao - ugao aberacije. Ugao aberacije se može izmeriti i on je vrlo mali, označava se sa α (slika 2). U talasnoj teoriji, brzine koje su prikazane na ovom dijagramu moraju se interpretirati kao brzine u odnosu na luminozni etar, medijum u kojem se svetlost prostire. Bilo koje kretanje etra koji se prostire između posmatrača na Zemlji i zvezde bi uticalo na svetlost koja se kreće između njih, tako da bi relativno kretanje svetlosti u odnosu na Zemlju bilo mnogo komplikovanije, a jednostavno objašnjenje zvezdane aberacije pozajmljeno iz emisione teorije bi propalo. Drugim rečima, zvezdana aberacija se poziva na stacionarni etar ili kako se još zove, imobilan etar.



Bredlijeva posmatranja zvezdane aberacije obezbedila su prvi astronomski dokaz za Kopernikanski heliocentrični model solarnog sistema. Ono što je još važnije, bilo je moguće grubo odrediti vrednost brzine svetlosti. Zasluge za preciznije određenje brzine svetlosti pripadaju Romeru (Ole Romer), koji je uz pomoć Jupiterovih satelita dobio konačnu brzinu svetlosti od 300 000 km/sec. Sve ovo je podržalo ideju da postoji konačna brzina svetlosti kao i ideju da je svetlost talasne prirode.

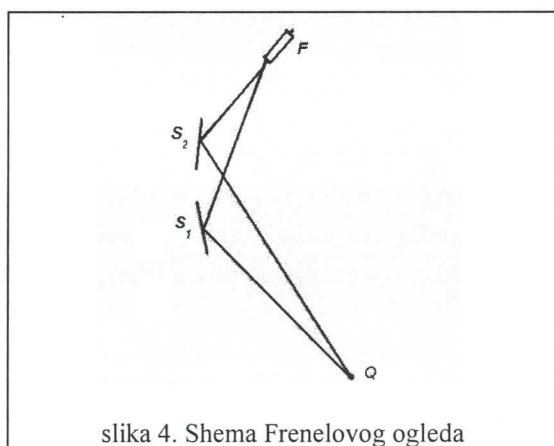
Teoriju da je svetlost talasne prirode, oživeo je Jung (Thomas Young, 1773-1829) u svojim radovima i upotrebo je princip interferencije za tumačenje šarenih pruga i prstenova na tankim slojevima providnih tela. Pojava superpozicije (slaganja) svetlosnih zrakova koja dovode do obrazovanja svetlih i tamnih pruga naziva se *interferencija svetlosti*. Jung je izveo ogled : osvetlio je mali otvor A na neprovidnom ekranu, koji postaje novi izvor sfernih talasa (slika 3.). Ti talasi stižu do sledeća dva mala otvora B₁ i B₂ koji sa svoje strane, postaju izvori talasa koji se međusobno prekrivaju u oblasti D.

Kako su oscilacije u otvorima B_1 i B_2 izazvane istim talasom koji pada na njih, one su jednakih faza i jednakih amplituda. Talasi koji polaze iz tačke B_1 i B_2 sastaju se u svakoj tački oblasti D sa razlikom u putu, određenom dužinama koje su oni prošli. U zavisnosti od te putne razlike oni se međusobno pojačavaju ili slabe. Na taj način zapaža se smenjivanje svetlih i tamnih pruga. Bitno je napomenuti da otvor moraju biti mali. Samo pri malim razmerama otvora A iza njega se pojavljuje pravilan talasni front koji predstavlja sfere, što obezbeđuje jednakost faza oscilacija u otvorima B_1 i B_2 pa, prema tome, određenu razliku u putu između talasa koji se sastaju. Ako ne bi bilo stalne fazne razlike, do pojačavanja talasa ne bi dolazilo uvek na jednim istim mestima i pruge bi se rasplinile.



slika 3. Shema Jungovog ogleda

Jungove ideje o talasnoj teoriji svetlosti široko je razvio Fresnel (Agustin Jean Fresnel, 1788-1827) tokom prve polovine XIX veka. Fresnel je posmatrao zrak svetlosti koji se reflektovao na dva ogledala koja su bila nagnuta jedno naspram drugog (slika 4.). Oba reflektovana zraka daju na mestu, gde se sastaju, pruge interferencije koje se mogu videti ukoliko se upotrebi uređaj za uvećanje (npr. durbin). Sličnih aparatura poput Freselove ima, i one se upotrebljavaju za eksperimentalne metode merenja veoma malih promena brzine svetlosti. Takvi uređaji se nazivaju interferometri. Princip rada je taj da se sa brzinom svetlosti menja i talasna dužina, pa se stoga interferencione šare pomaknu.



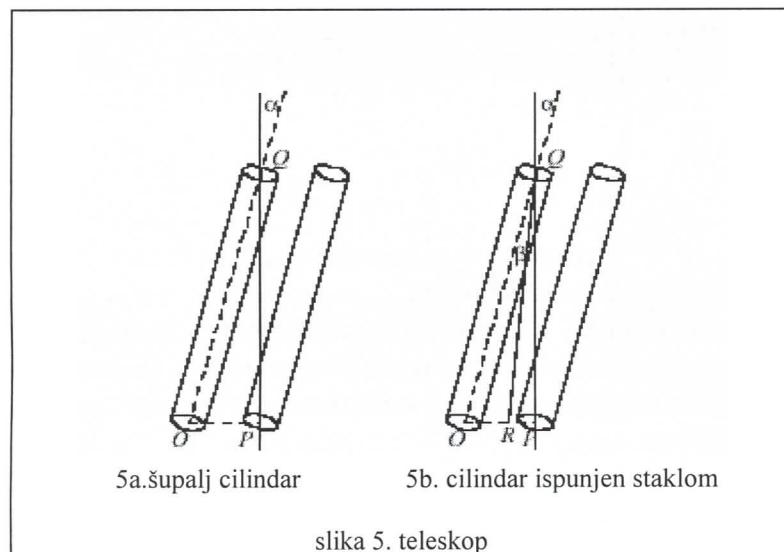
slika 4. Shema Frenelovog ogleda

S obzirom da je jedva moguće pojave interferencije drugačije interpretirati nego talasnom teorijom, ipak su za opšte priznanje te teorije postojale dve poteškoće. Prva je provolinisko širenje svetlosti, a druga je pojava polarizacije. Prva poteškoća se sama razjasnila tačnijim razrađivanjem talasne teorije. Fenomenom polarizacije prvi su se bavili Malus (Etienne Louis Malus) i Bruster (Dawid Brewster). Polarizacija predstavlja proces takvog uzajamnog delovanja svetlosti sa nekom prozračnom sredinom, pri kome se nepolarizovana svetlost pretvara u polarizovanu. Polarizovana svetlost jeste takva svetlost čiji talasi osciluju u jednoj ravni. Dakle takvi talasi su ustvari transverzalni, što je bilo u suprotnosti sa teorijom Junga i Frenela koji su smatrali da su talasi longitudinalne prirode. Da bi talasnu teoriju uskladili sa pojavom polarizacije Jung i Frenel su se odlučili da se svetlost ipak sastoje od transverzalnih talasa. Da bi mogli da postoje takvi transverzalni talasi, etar je morao da ima dovoljnu čvrstinu da bi se snabdeo silama koje bi se suprotstavile distorziji koju su stvarali ti talasi. Drugim rečima etar je trebao da bude čvrsto telo. Ovu novu sliku etra teško je bilo pomiriti sa hipotezom nepokretnog etra na koju ne utiče kretanje materije. Prirodni je bilo pretpostaviti da se etar povlači zajedno sa materijom. Najverovatnije, prvi koji je ozbiljno predložio ovu hipotezu još 1831. god. bio je Koši (Augustin Louis Cauchy, 1789-1857), međutim sve zasluge je dobio Stoks (George Gabriel Stokes, 1819-1903). Zastupao je gledište (1845. god) da etar koji se nalazi unutar materije potpuno učestvuje u njenom kretanju. On je pretpostavio, da Zemlja potpuno nosi sa sobom etar u svojoj unutrašnjosti i da se to kretanje etra prema spoljašnjosti pomalo smanjuje, do mirovanja svemirskog etra. Jasno je onda da sve svetlosne pojave na Zemlji teku isto tako, kao da Zemlja miruje. Da ne bi svetlost, koja dolazi od zvezda, u prelaznom sloju između svemirskog etra i pokretnog etra Zemlje promenilo brzinu ili smer, bilo je potrebno formulisati posebnu hipotezu o kretanju etra. Stoks je našao takvu hipotezu koja je zadovoljavala sve optičke uslove, ali kasnije je dokazano da nije u skladu sa zakonima mehanike. Brojni pokušaji da se spase Stoksova teorija su propali.

1.2 Frenelov koeficijent

Problem prelamanja svetlosti na telima koja se kreću postaje vrlo sporan u talasnoj teoriji svetlosti zbog jednog eksperimenta koji izveo 1810. god. Arago (Francois Arago, 1786-1853). On je zapravo htio da odredi da li će se svetlosne čestice nakon što uđu u prizmu različito prelamatati ako se kreću različitim brzinama u odnosu na prizmu. Ovome treba dodati da je on razmatrao prelamanje svetlosti sa iste zvezde tokom cele godine. Promena brzine kretanja Zemlje u odnosu na zvezdu bi trebalo da doprinese promenama relativne brzine kretanja Zemlje i svetlosnih čestica koje emituje zvezda. Arago je shvatio da do takvog efekta nije došlo pri prelamanju svetlosti zvezde. Prelamanje je uvek pratilo Snelov (Snell) zakon $\sin i = n \sin r$ (i je upadni ugao, r je ugao prelamanja, a n indeks prelamanja). Poprilično neverovatno objašnjenje koje je Arago morao da prihvati je to da zvezde emituju svetlosne čestice različitih brzina, ali da bi bile vidljive posmatraču neophodno je da relativna brzina svetlosnih čestica i posmatrača bude u uskom intervalu. Na osnovu toga sledi da sve svetlosne čestice čije je prelamanje

Arago posmatrao imaju u suštini istu brzinu u odnosu na prizmu, nezavisno od relativnog kretanja Zemlje i zvezde koja emituje te čestice. Arago je poslao Frenelu pismo u kojem ga je pitao da li se ova posmatranja mogu objasniti talasnom teorijom. U čuvenom pismu upućenom Aragu, Frenel je predstavio važnu modifikaciju teorije nepokretnog etra koja je uračunala Aragov rezultat, modifikacija koja je dospela u žihu interesovanja mnogih istraživanja, kako eksperimentalnih tako i teorijskih. Da bi se objasnila Frenelova modifikacija moramo se na čas vratiti na fenomen zvezdane aberacije. Diskusija o aberaciji će biti adekvatna ako položaji zvezda budu određeni sa jednom vrstom primitivnog teleskopa prikazanog na slici 5.



Na slici je prikazan teleskop - šupalj cilindar koji smo ustremili ka zvezdi. Na osnovu jednostavne geometrije (slika 5a.) imamo :

$$\tan \alpha = \frac{OP}{PQ} = \frac{v}{c}$$

gde je v brzina teleskopa, a c je brzina svetlosti.

Na slici 5b. prikazan je takođe teleskop, ali sada sa cilindrom koji je iznutra ispunjen stakлом sa ravnom površinom na oba kraja. Da li ćemo meriti isti ugao aberacije i ovim uređajem? Kao što ćemo videti kasnije, posmatranja ukazuju na to da ćemo meriti isto. Pitanje je kako talasna teorija može da objasni taj rezultat. Ako hipotezi nepokretnog etra ne bi dodali još neke zaključke, ugao aberacije ne bi bio isti za oba cilindra. Zbog refrakcije koja nastaje kada svetlosna čestica pogodi stakleni cilindar u tački Q , svetlost bi trebalo da prati putanju QR . Posmatranja ukazuju na to da će putanja biti QP kao na levoj slici. Međutim mora se prepostaviti da kada svetlost pogodi staklo ona dobija određeni deo f brzine stakla v , koja obezbeđuje da putanja ostaje QP . S obzirom na geometriju na slici 5. možemo odrediti koliko velik taj deo treba da bude. Pošto su α i β vrlo mali (mnogo manji nego na slici), Snelov zakon se može napisati kao $\tan \alpha = n \tan \beta$, a ugao ORQ se može razmatrati kao prav ugao. Koristeći da je $OP = v \Delta t$, $RP = f v \Delta t$ i

$QR = (c/n)\Delta t$ gde je Δt vreme koje je potrebno da teleskop dospe iz pozicije O do P, a svetlosti da dospe iz Q do P nalazimo:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &\approx n \tan \beta \\ &\approx n \frac{OR}{RQ} \\ &= \frac{OP - RP}{RQ} n \\ &= n \frac{v - fv}{c/n} \\ &= n^2 (1-f) \frac{v}{c} \end{aligned}$$

Iz dobijene relacije sledi da će ugao aberacije u staklenom cilindru biti isti kao i bez stakla ako i samo ako se staklo povlači sa svetlošću koja putuje kroz staklo sa delom

$$f = 1 - \frac{1}{n^2}$$

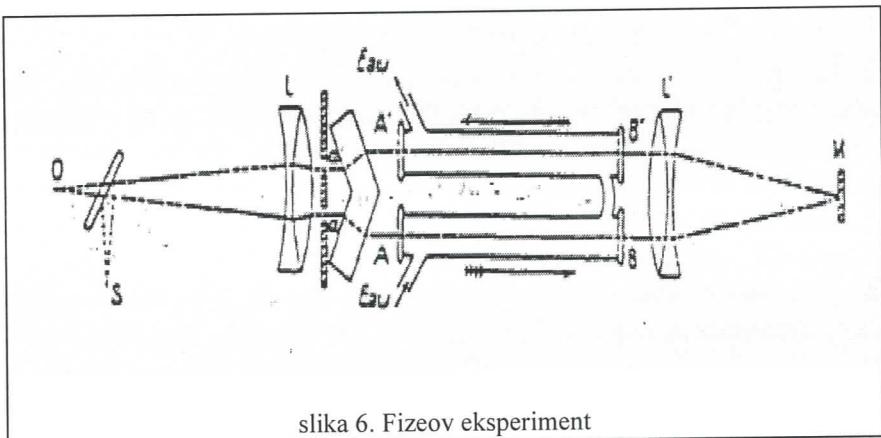
što predstavlja Frenelov koeficijent ili koeficijent povlačenja.

Situacija prikazana na slici 5b. je poseban slučaj fenomena koji je Arago proučavao, prelamanje svetlosti koja pogoda površinu koja se kreće. Sa tačke gledišta posmatrača sa Zemlje svetlost, u situaciji koja je prikazana na slici 5b., pogoda staklenu površinu uspravno (normalno) na vrhu našeg primitivnog teleskopa. Ako svetlost pada pod pravim uglom u odnosu na posmatrača na Zemlji, svetlost se neće pralamati već će nastaviti svoj put u istom smeru. To bi trebalo da važi i sa tačke gledišta onoga ko miruje u etru, a na slici je to smer QP. Kao što se vidi Frenelov koeficijent obezbeđuje da se ovo zapravo i dešava. Bez ovog efekta svetlost bi putovala u smeru QR. U tom slučaju svetlost bi se prelamala u skladu sa Snelovim zakonom sa tačke gledišta nekoga ko miruje u etru, ali ne sa tačke gledišta nekog posmatrača na Zemlji. Drugim rečima, Frenelov koeficijent obezbeđuje da prelamanje svetlosti na telima koja se kreću prate Snellov zakon sa tačke gledišta posmatrača koji se kreće zajedno sa tim telom. Frenel je ustanovio, na osnovu Aragovog opažanja, da materija nosi etar samo delimično sa sobom.

U skladu sa ubedjenjima koja su postojala, svi pokušaji da se otkrije kretanje Zemlje u odnosu na etar putem eksperimenata sa refrakcijom su imali negativne rezultate. Takve eksperimente su uradili Respiđi i Huk (Lorenzo Respighi, Martinus Hoek) 1868. god. Godine 1871. Eiri (George Biddell Airy 1801-1892) je u eksperimentu koji je prvi predložio Ruđer Bošković, potvratio da teleskop napunjen vodom ne utiče na ugao aberacije. Dakle, aberacija kao efekat prvog reda iščezava ako se posmatrač i svetlosni talas ne kreću jedan naspram drugog, a ne zavisi od supstance kroz koju svetlost prolazi.

Godine 1851. odmah nakon što su Frenel i Fuko (Jean Foucault, 1819-1868) pokazali da je moguće odrediti brzinu svetlosti u laboratoriji, Fize (Hippolyte Fizeau, 1819-1896) je konstruisao metod, koji bi stavio Frenelovu vrednost brzine svetlosti u medijumu koji se kreće na direktnu proveru.

Eksperiment je prikazan na slici 6. Fize je ispitao da li voda koja protiče duž pravca AB B'A' nosi sa sobom svetlost. Imamo dva svetlosna zraka koji se kreću, jedan u pravcu (ABB'A'), a drugi suprotno od pravca protoka vode (A'B'BA). Kada svetlost ide u smeru protoka vode, njoj će trebati mnogo manje vremena za putovanje od svetlosti koja putuje



suprotno protoku vode. Ovo se može uporediti sa vremenskom razlikom kada bi plivač plivao protiv struje ili kada bi ga stuja nosila. Upravo ta razlika u brzinama omogućila je različite interferencione pomake. Tačna merenja su se u potpunosti slagala sa Frenelovom formulom povlačenja, na taj način Fizeovi rezultati snažno su podržali teoriju povlačenja etra kao što je bilo i predviđeno Frenelovim koeficijentom.

Uprkos neospornog uspeha Frenelovog koeficijenta koji je bio uračunat u posmatranim fenomenima, osnovni fizički mehanizam efekta je bio nejasan. Kada je Frenel predstavio svoj koeficijent, on je takođe predložio fizički mehanizam, ali on nije doživeo takvu uspešnost kao formula. Sledeći Junga, Frenel je pretpostavio da je gustina etra u transparentnom medijumu proporcionalna kvadratu indeksa prelamanja medijuma. On je zatim pretpostavio da, u optički gustim medijumima, samo etar čija je gustina veća od toga, ispunjava ceo svemir, i biva nošen zajedno sa medijumom. Pokazao je da iz ovih pretpostavki sledi da se etar u medijumu koji se kreće brzinom v , kreće brzinom

$$f = 1 - \frac{1}{n^2}, \text{ koji je deo brzine } v.$$

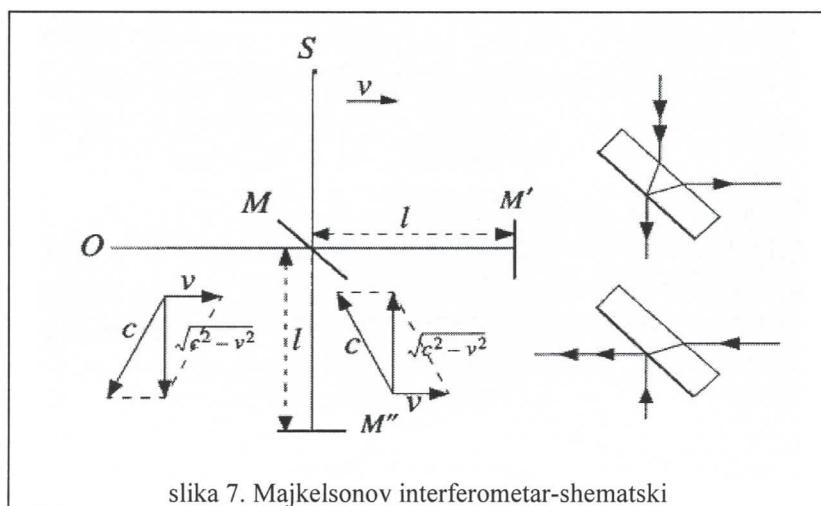
2. Majkelsonov eksperiment

Ubrzo nakon što je objavio svoj rad prvenac, u kojem je prvi identifikovao svetlost kao elektromagnetni talas, Maksvel (James Clerk Maxwell 1831- 1879) je predstavio eksperiment usmeren ka detektovanju efekta refrakcije na pretpostavljeno kretanje Zemlje kroz etar. On je izvestio o negativnom rezultatu eksperimenta u članku koji je poslao Stoksu 1864 god. radi publikacije u novinama *Proceeding of the Royal Society*. Kada ga je Stoks obavestio da je Arago već davno uradio sličan eksperiment, pri čemu je Frenel uspeo da objasni negativan rezultat takvog eksperimenta pomoću koeficijenta povlačenja, Maksvel je povukao članak.

Skoro pred samu smrt, Maksvel se vratio problemu kretanja Zemlje u odnosu na etar. U jednom naslovu "Ethar" za deveto izdanje *Encyclopaedia Britannica*, predlagao je da je jedini način da se izmeri brzina kretanja Zemlje u odnosu na etar, u laboratorijskim uslovima, da se potraži promena brzine svetlosti koja putuje napred i unazad između dva ogledala. Jednostavan proračun pokazuje da je efekat koji se pripisuje povlačenju etra, a koji se očekuje u ovakovom eksperimentu reda veličine v^2/c^2 , za koji je Maksvel mislio da je vrlo mali da bi se izmerio. Međutim, on je ipak razmišljao o jednom astronomskom rešenju merenja brzine Sunčevog sistema u odnosu na etar, u kojem bi efekti koji bi trebali da se izmere bili reda veličine v/c . Maksvel je uputio pismo američkom astronomu Todu (D.P.Todd, 1855-1939) da bi saznao da li su postojeći astronomski podaci bili tačni za ovakav način rada. Tod je morao da ga razočara. Maksvel je umro odmah zatim i njegovo pismo upućeno Todu je bilo objavljeno u listu *Nature*.

Maksvelovo pismo je zapalo za oko Majkelsonu (Albert Abraham Michelson, 1852-1931), mladom oficiru u američkoj mornarici, koji je već imao veliku reputaciju za merenja brzine svetlosti visoke preciznosti. On je prihvatio izazov i pokušao je da izmeri brzinu svetlosti putem zemaljskih merenja, za koje je Maksvel smatrao da je nemoguće izmeriti. Na slici 7. je šematski prikaz instrumenta koji je Majkelson konstruisao u ovo svrhu, poznat danas kao Majkelsonov interferometar.

Svetlost iz svetlosnog izvora S pada na posrebreno ogledalo M koje delom odbija (reflektuje) a delom transmituje (propušta) svetlost. Odbijeni zraci putuju napred i nazad duž MM' kraka a propušteni zraci putuju duž drugog kraka interferometra MM''. Dva zraka se ponovo vraćaju na ogledalo M a delovi oba zraka koji su reflektovani i propušteni putuju u pravcu MO. U tački O može se videti prugasta šara interferencije koju su ova dva zraka proizvela.



slika 7. Majkelsonov interferometar-shematski

Ako pretpostavimo da se etar kreće brzinom v u odnosu na interferometar, vreme koje je potrebno svetlosti da pređe put napred i nazad duž kraka MM' čija je dužina l paralelna sa v je dato kao :

$$\frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} \approx \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (2.1)$$

Vreme koje je potrebo svetlosti takođe da pređe put dužine l , napred i nazad duž kraka MM'' , ali normalno na v je dato sa :

$$\frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (2.2)$$

Kao što se može videti uz pomoć vektorskih dijagrama na slici, svetlost koja putuje nazad i napred duž kraka MM'' ima brzinu $\sqrt{c^2 - v^2}$ u odnosu na interferometar. Primetimo da je efekat povlačenja etra za ovo vreme pređenog puta zaista reda veličine v^2/c^2 kao što je i ukazao Maksvel. Ova dva izraza ukazuju na to da svetlost putujući napred – nazad duž kraka paralelnog etarskom povlačenju traje duže od putovanja svetlosti napred-nazad duž kraka iste dužine ali koji se nalazi normalno na pravac etarskog povlačenja. Ta razlika je aproksimativno

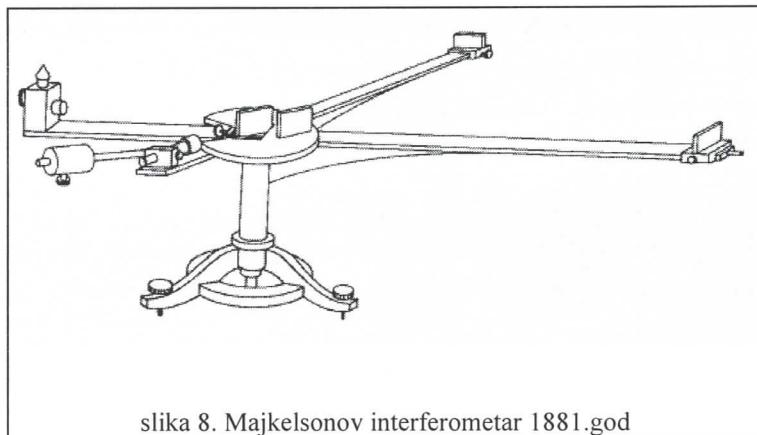
$$\frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2} \quad (2.3)$$

Majkelson je isprva mislio da će etarski drift uticati samo na vreme putovanja u kraku koji je paralelan njemu, a da će vreme putovanja u kraku koji je normalan na etarski drift biti naprosto $2l/c$, kao kada bi interferometar mirovao u etru. Kao rezultat, on je precenio vremensku razliku između ova dva puta za faktor 2.

Šare interferencije u tački O zavise od razlike u fazama između svetlosnih talasa koji dolaze sa kraka MM' i sa kraka MM'' . Da bi se održala fazna razlika, nastala etarskim driftom, vremenska razlika u putovanju svetlosti mora se pomnožiti frekvencijom f određene svetlosti. Kako je talasna dužina $\lambda = c/f$, ova fazna razlika se može napisati kao :

$$\frac{l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \quad (2.4)$$

Izraz jasno pokazuje zašto će biti moguće meriti efekat. Čak iako je odnos v^2/c^2 vrlo mali, reda veličine 10^{-8} , odnos dužine krakova i određene talasne dužine svetlosti može biti vrlo velik. Nažalost, odnos se menja samo u faznim razlikama koje se mogu videti kao promene šara interferencije. Iz ovog razloga Majkelson je konstruisao interferometar koji može da se okreće. Ako je krak MM' u smeru v kao što je dato na slici 7. faza svetlosti iz MM' će zaostajati za fazom svetlosti zraka koji dolazi iz MM'' . Ako aparaturu zarotiramo za 90° , zameniće se uloge ovih dvaju krakova i faza svetlosti iz MM' biće ispred faze svetlosti MM'' .



slika 8. Majkelsonov interferometar 1881.god

Kako interferometar rotira očekivaće se da se vidi promena u faznim razlikama za iznos dva, dat u izrazu iznad.

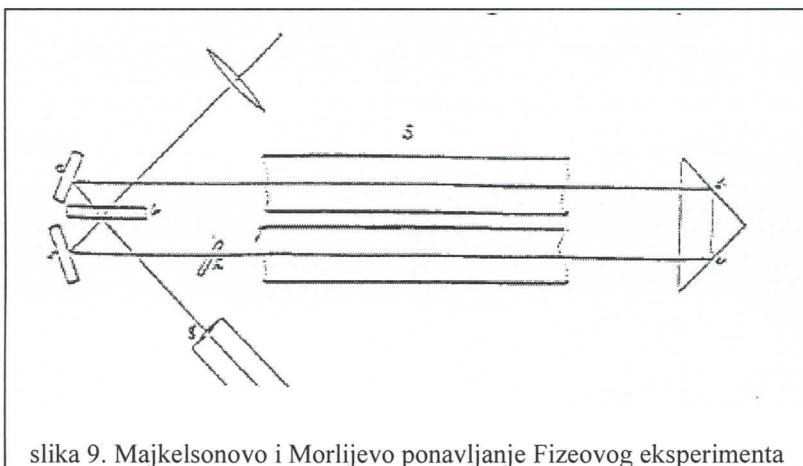
Kasne 1880. god. Majkelson je napustio mornaricu i otišao u Evropu da bi usavršio svoja istraživanja. On je razvio ideju eksperimenta etarskog povlačenja u Parizu a zatim je otišao u Berlin gde je započeo pripreme za taj eksperiment u laboratoriji Helmholca (Hermann von Helmholtz, 1821-1894). Na slici 8. dat je Majkelsonov interferometar. Dužina krakova ovog instrumenta je oko 120 cm. Na osnovu pretpostavke da je brzina kretanja Zemlje u odnosu na etar istog reda veličine kao i brzina kretanja Zemlje u svojoj orbiti oko Sunca i ima merljivu komponentu u ravni koja je obuhvaćena kracima interferometra, Majkelson je očekivao da će pronaći fazne razlike koje će biti oko jedne desetine pomaka prilikom rotiranja aparature. Ovo je vrlo slab efekat koji bi se lako mogao poremetiti temperaturskim kolebanjima, savijajući se oko mesinganih krakova prilikom rotacije, a da ne pominjemo vibracije od saobraćaja u Berlinu koji je skoro onemogućio da se uopšte i proizvedu interferencione šare. Da bi izbegao ovu poslednju poteškoću, Majkelson je na kraju odlučio da premesti aparaturu u susedni ali vrlo mirni, rustični Potsdam. Tamo je bio u mogućnosti da kontroliše mnoge greške koje su sejavljale, ali nije uočio nikakve sistematiche fazne razlike. Najveća fazna razlika koju je on posmatrao je bila oko 0.02, koja je izgleda nastala zbog zaostalih poremećaja različitih vrsta.

1881. godine Majkelson je u radu, u kojem je opisao eksperiment i negativni rezultat istog, izveo vrlo jasan zaključak : " Interpretacija ovog rezultata je ta da nema premeštanja interferencionih pruga. Rezultat hipoteze stacionarnog etra je dokazano netačan i dalji neophodan zaključak koji se izvodi je da je hipoteza pogrešna" (Michelson 1881, p 128). On je potkreplio svoj zaključak tako što je citirao jedan paragraf iz Stoksovog rada (1846. b) izražavajući poželjnost pronalaženja eksperimenta koji bi odlučio između Frenelove teorije zasnovane na imobilnom etru i njegove sopstvene teorije zasnovane na povlačenju etra. Korišćenje ovog citata ukazuje da je Majkelson bio pod utiskom da je on obezbedio takav jedan eksperiment.

Isprva eksperiment nije privlačio mnogo pažnje i Majkelson se vratio svojim merenjima brzine svetlosti. Nije se čak ni trudio da izda ispravku greške faktora 2, koji je nastao zanemarivanjem efekta etarskog povlačenja u odnosu na vreme putovanja u kracima normalnim na kretanje Zemlje. Potier (Alfred Potier, 1840-1905) je prvi obratio pažnju na ovu grešku kada je Majkelson demonstrirao svoj interferometar u Parizu 1881. god. Majkelsonovo interesovanje za eksperimente etarskog povlačenja ponovo je bilo zapaženo 1884. god. kada je on prisustvovao predavanjima Tomsona (William Thomson,

1824-1907) poznatijeg kao Lord Kelvin, u Baltimoru. Majkelson je u međuvremenu bio otpušten iz mornarice i postao je istaknuti profesor fizike tada oformljenog fakulteta primenjenih nauka u Klivlendu (Case School of Applied Science, Cleveland). Jedan od njegovih kolega profesor hemije na tom fakultetu bio je Morli (Edward Williams Morley, 1838-1923) koji je išao zajedno sa Majkelsonom u Baltimor. To je bio zapravo početak bliske saradnje od nekoliko godina između ove dvojice, koji se završio naglo kada je Majkelson prihvatio mesto na Klark Univerzitetu (Clark University) 1889. godine.

Tomson i Strut (John William Strutt, 1842-1919) poznatiji kao Lord Rejli, koji je takođe došao u Baltimor i sa kojim se Majkelson konsultovao neko vreme, nagovarali su Majkelsona da ponovi svoj eksperiment etarskog povlačenja iz 1881. godine. Za pripremu, savetovali su mu da ponovi čuveni eksperiment Fizea iz 1851. god. da bi što tačnije testirao Frenelov koeficijent. Koristeći tehniku vrlo sličnu onoj iz 1881. za eksperiment etarskog povlačenja Majkelson i Morli su mogli da potvrde Frenelovu formulu sa mnogo većom tačnošću od Fizea. Na slici 9. je prikazana aparatura koju su koristili.



slika 9. Majkelsonovo i Morlijevo ponavljanje Fizeovog eksperimenta

Kada su objavili svoje rezultate 1886. godine, Majkelson i Morli izvukli su tačne, potpuno suprotne zaključke onima koji su zaključeni 1881. godine, a to je da : “ Rezultati ovog rada ukazuju na to da je rezultat koji je saopštio Fize u suštini tačan, i da je luminozni etar upotpunosti netaknut kretanjem materije koju on prožima” (Michelson and Morley 1886, p 386).

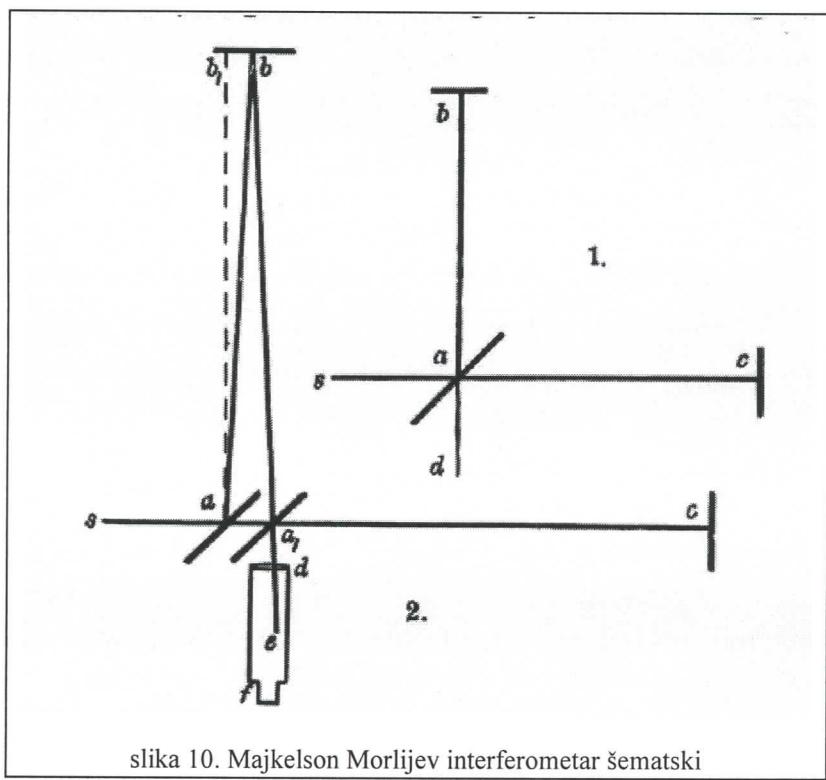
Naredni zadatak je bio ponavljanje Majkelsonovog eksperimenta iz 1881. godine, da bi se videlo da li tačnija verzija eksperimenta, posle svega, može da objasni etarski drift kao što se i očekivalo na osnovu hipoteze nepokretnog etra. Pored toga motivacija za ovakav poduhvat je bio i članak iz 1886. god. koji je objavio Lorenc (Hendrik Antoon Lorentz , 1853-1928). U ovom članku Lorenc je pregledao oba rada i teoretski i praktični jer se pitao da li će se ili neće etar povlačiti zajedno sa Zemljom. Lorenc je kritikovao Stoksovo obašnjenje zvezdane aberacije, pokazujući da je niz prepostavki koje je Stoks izneo o kretanju etra potpuno nesaglasno jedno s drugim. Etar koji se nalazi na Zemljinoj površini ne bi mogao da bude u stanju mirovanja u odnosu na Zemlju, ali je tada Lorentz smatrao, odnosno ostavio je otvorenu mogućnost, da se etar na površini Zemlje bar delimično povlači zajedno sa Zemljom.

2.1 Majkelson - Morlijev eksperiment

Majkelson - Morlijev eksperiment je jedan od najčuvenih eksperimenata ikada izvedenih, i ima jedinstveno mesto kako u istoriji tako i u empirijskim temeljima specijelne teorije relativnosti. Ovaj eksperiment ponavljan je veliki broj puta sa sve savršenijom tehnikom, od Clevelenda do Postdama, počev od 1887. godine pa sve do tridesetih godina prošlog veka.

Prvobitno je bio isplaniran kao test koji bi trebao da dokaže postojanje etra, medijuma koji je nosio elektromagnetne talase, i čijim mirovanjem bi bio potkrepljen stav Njutna o apsolutnom prostoru. Neuspeh eksperimenta da dokaže očekivanu anizotropiju brzine svetlosti u okviru kretanja kroz etar suočila je naučnu misao s kraja 19. veka sa određenom zagonetkom koju je na kraju rešio Ajnštajn sa svojom specijalnom teorijom relativnosti.

Eksperiment se zasnivao na korišćenju interferencije svetlosti, a cilj je bio da se odredi brzina Zemlje (v) u odnosu na apsolutni koordinantni sistem koji je bio vezan za etar. Očekivani ishod eksperimenta je bio da će brzina svetlosti biti c kada se meri u odnosu na apsolutni koordinantni sistem (sistem reference etra), a da će u odnosu na sistem reference koji je vezan za Zemlju biti $c+v$ ili $c-v$ u zavisnosti da li se svetlosni snop emituje u smeru kretanja ili suprotno kretanju Zemlje respektivno. Aparatura koja se koristila prikazana je na slici.



slika 10. Majkelson Morlijev interferometar šematski

Na prvoj slici je prikazan svetlosni izvor s , odakle je pušten svetlosni zrak na jednu ploču pod uglom od 45° . Ploča je bila od stakla i vrlo tanka, a posrebrena tako da bude polupropustljiva, tj. da jedan deo svetlosti odbija a jedan deo da propušta. Uzeto je da su



kraci ac i ab jednakih dužina a na krajevima se nalaze ogledala c i b tako da zrak pada pod pravim uglom na oba ogledala. Uređaj je podešen tako da zrak sac bude u pravcu kretanja Zemlje, a zrak ab normalno na taj pravac. Ako su ova dva zraka jednakih putanja, onda oni interferiraju duž ad . Zamislimo sada, da čitavu aparaturom pomerimo u smeru sc brzinom kojom se Zemlja kreće u svojoj orbiti (slika 10). Zrak sa se prelama duž ab , ugao bab_1 jednak je uglu aberacije α , a kada se vrati taj zrak duž ba_1 ($aba_1 = 2\alpha$) ide u fokus teleskopa čiji je smer nepromjenjen. Propušteni zrak se kreće duž ac vraća se putem ca_1 i reflektuje se duž a_1 , formirajući ca_1e koji je jednak $90 - \alpha$, i zbog toga i dalje koincidira sa prvim zrakom. Može se uočiti da se sada zraci ba_1 i ca_1 ne susreću tačno u istoj tački a_1 . Primetimo da je razlika drugog reda, ali ovo ne utiče na valjanost zaključivanja.

Ako posmatramo zrak ac njegova brzina u odnosu na Zemlju će biti $c+v$ a u suprotnom smeru $c-v$, pri čemu je ovde primenjen zakon sabiranja brzina. Vreme za koje svetlosni zrak pređe put aca_1 biće :

$$t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.5)$$

Vrema za koje svetlosni zrak, koji je normalan na Zemljino kretanje, pređe put aba_1 označićemo sa t_2 i ono iznosi

$$t_2 = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.6)$$

Ovo se lako može uočiti na osnovu slike, primenom pitagorine teoreme na trougao aba_1 pri čemu imamo da je

$$l^2 = \left(\frac{ct_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{vt_2}{2} \right)^2 \quad (2.7)$$

S obzirom da se iz izraza vidi da ova dva vremenska intervala nisu jednakia, njihova razlika će biti :

$$t_1 - t_2 = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (2.8)$$

Posle obrtanja aparature za 90° dobiće se odgovarajući vremenski intervali t_1' i t_2' u obliku :

$$t_1' = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.9)$$

$$t_2' = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.10)$$

pa je njihova razlika :

$$t_1' - t_2' = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (2.11)$$

Razlika između neprimovanih i primovanih koordinata biće :

$$(t_1 - t_2) - (t_1' - t_2') = \frac{4l}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (2.12)$$

S obzirom da je brzina Zemlje u odnosu na apsolutni sistem (etar) oko $v = 30 \text{ km/sec}$, onda dobijamo za $(\frac{v}{c})^2 \approx \frac{1}{10^8}$, što je vrlo mali broj.

Interferencioni pomeraj se prema tome može lako izračunati ako zanemarimo stepene četvrtog reda i viših. Odnos veličine tog pomeraja Δd u durbinu f , i širine ili rastojanja među interferencionim prugama d , jednak je odnosu dobijene vremenske razlike i perioda oscilacija svetlosnog talasa. Taj odnos iznosi :

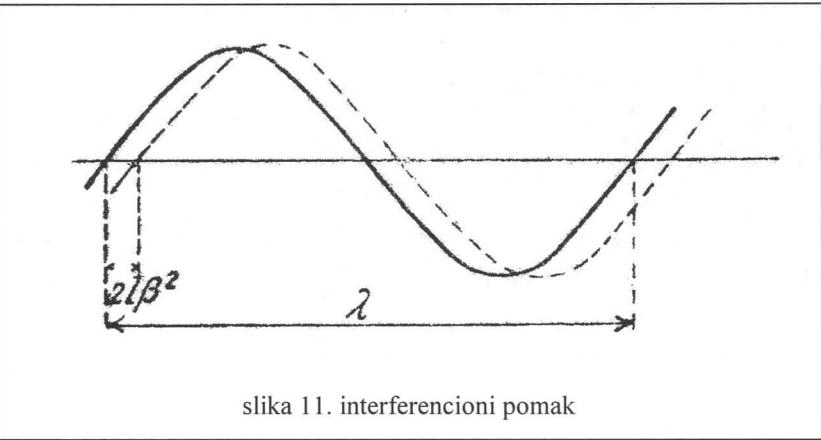
$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{4l}{cT} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (2.13)$$

ako razvijemo u red izraz na desnoj strani i zanemarimo članove $\left(\frac{v}{c}\right)^4$ i višeg stepena dobijamo:

$$\frac{\Delta d}{d} \approx \frac{2l}{cT} \frac{v^2}{c^2} = \frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \quad (2.14)$$

pri čemu je λ talasna dužina svetlosti tj. $\lambda = cT$.

Oba talasa koja interferiraju, pomeriće se međusobno pri okretanju aparature za pomak, čiji je vrednost u odnosu na talasnu dužinu data izrazom $\frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$. Razmak pruga odgovara razlici puta od jedne talasne dužine, zato je očekivani pomak pruga deo $\frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$ od širine pruga (slika 11.)



Ako se uzme da je razdaljina puta $11m$ i da je talasna dužina otprilike $5.9 \times 10^{-5} cm$, dobijamo sledeće:

$$\frac{2l v^2}{\lambda c^2} = \frac{2 \cdot 1.1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8}}{5.9 \cdot 10^{-5}} = 0.37$$

odnosno pruge interferencije moraju se kod okretanja aparature pomeriti za više od $1/3$ svog razmaka. Kada je eksperiment sproveden nije se pokazao ni najmanji trag očekivanog pomeraja, a i kasniji eksperimenti koji su bili izvedeni sa još boljom aparaturom dali su isti rezultat. Dakle ovaj eksperiment je dao negativan rezultat, jer se postojeća teorija nije slagala sa tim rezultatom. Uzevši u obzir greške samog merenja zaključilo se da interferencija i ne postoji, odnosno postojanje etra je dovedeno u pitanje.

3. Kenedi - Torndajk eksperiment

Majkelson - Morlijev test, koji predstavlja temelj specijalne teorije relativnosti, bio je modifikovan nekoliko puta. Već 1932. godine njega su modifikovali Kenedi i Torndajk (Roy J. Kennedy, Edward M. Thorndike). Polazna tačka za ova eksperimenta su bile Lorentzove transformacije

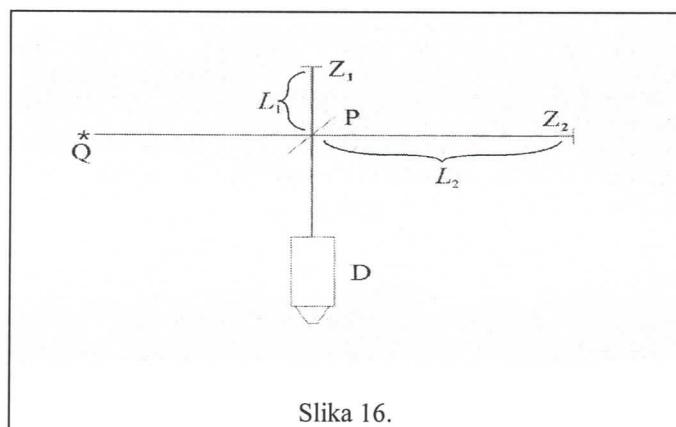
$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)\end{aligned}$$

gde je $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Pored nekoliko klasičnih testova, koji su zadovoljavali princip relativnosti, izgleda da ni jedan nije bio posebno posvećen pitanju osobine vremena koje je bilo uključeno u istraživanja. Čini se da je teoriji bila potrebna potvrda, posebno u njenom revolucionarnom aspektu negiranju apsolutnosti vremena. Upravo eksperiment Kenedi - Torndajka (KT eksperiment) pokušava da obezbedi dokaz za dilataciju vremena.

Princip na kojem je zasnovan eksperiment je da ako se snop homogenog svetla deli na polureflektujućoj podlozi na dva snopa, koji se nakon pomeranja putanja različitih dužina ponovo spaja, onda će relativne faze superponiranih snopova zavisiti od brzine aparature osim ako frekvencija svetlosti zavisi od brzine na način koji zahteva relativnost. Nadalje, fazna razlika se može stvoriti da bi se odredila pozicija pomeraja šare na interferentnoj slici, tako da se može odrediti na osnovu merenja ovih pozicija za različite brzine sistema da li frekvencija sledi relativističke zahteve. Različite brzine nastaju zbog kretanja Zemlje u vidu revolucije i rotacije. Bitna razlika između Majkelson – Morlijevog i Kenedi – Torndajkovog eksperimenta je bila ta što su u drugom eksperimentu korišćeni kraci različitih dužina. Rezultat je takođe bio negativan, kao i kod MM eksperimenta, bez obzira na doba godine.

Ako prepostavimo da se aparatura (slika 16.) kreće prema etru brzinom v , možemo izračunati putanje svetlosti.



Za putanje svetlosti od P do Z_1 i nazad dobijamo:

$$l_I = \frac{2L}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.1)$$

ali umesto L uvrstićemo i uzeti u obzir da se taj krak promenio i to tako da je u kretanju njegova dužina:

$$L = L_1 \frac{k(v)}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.2)$$

gde je $k(v)$ nepoznati faktor.

Dakle za putanjу l_I biće:

$$l_I = 2L_1 \frac{k(v)}{(\sqrt{1-\beta^2})^2} \quad (3.3)$$

Putanja svetlosti od P do Z_2 iznosi

$$l_{II} = 2L_2 \frac{k(v)}{(\sqrt{1-\beta^2})^2} \quad (3.4)$$

Razlika između ovih putanja iznosi:

$$l_{II} - l_I = 2(L_2 - L_1) \frac{k(v)}{(\sqrt{1-\beta^2})^2} \quad (3.5)$$

S obzirom na dobijenu istu razliku (jer se dužine množe istim faktorom $k(v)$ bez obzira da li su one normalne ili u smeru kretanja aparature), jasno je da se okretanjem aparature ne dobijaju pomaci šara interferencije. U eksperimentu KT postavlja se glavno pitanje: da li će se šare interferencije pomaći usled promene brzine prema etru. Uzeće se u obzir dva slučaja: kada se aparatura kreće i kada miruje u odnosu na etar.

Pomak šara nastaje usled promene razlike broja talasnih dužina na oba puta koja je svetlost prešla. Odnosno, ako su oba kraka iste dužine, kao u MM ogledu, videće se svetlo polje jer je svetlost obeju zraka u fazi (breg talasa sastaje se sa bregom a dolina sa dolinom). Ako se putanje razlikuju za pola talasne dužine breg će se sastati sa dolinom pa se talasi međusobno poništavaju odnosno vidi se tamno polje.

Prvo će se izračunati razlika broja talasnih dužina kada aparatura miruje. Frekvencija svetlosti je v , a njena talasna dužina je:

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

Broj talasnih dužina na putu L_1 je:

$$\frac{2L_1}{\lambda} = \frac{2L_1 v}{c} \quad (3.6)$$

a na putu L_2 je:

$$\frac{2L_2}{\lambda} = \frac{2L_2 v}{c} \quad (3.7)$$

Razlika između broja talasnih dužina (n) je:

$$n = \frac{2L_1 v}{c} - \frac{2L_2 v}{c} = (L_1 - L_2) \frac{2v}{c} \quad (3.8)$$

Sada će se razmatrati slučaj kada se aparatura kreće brzinom v . Pri tome treba uzeti u obzir da je zbog rezultata o dilataciji vremena frekvencija izvora svetlosti smanjena, pa taj izvor u sekundi odašilje $v' = v\sqrt{1-\beta^2}$ talasa. Vreme koje je potrebno svetlosti od P do Z_1 i nazad dobija se iz relacije:

$$t_I = \frac{l_I}{c}$$

analogno za vreme t_{II} dobija se:

$$t_{II} = \frac{l_{II}}{c}$$

Broj talasa od P do Z_1 i nazad dobija se ako se uoči da je nekom talasu koji je krenuo od P bilo potrebno vreme t_I da se vrati po toj putanji do P . Broj odaslatih talasnih dužina na tom putu tada iznosi:

$$v' t_I = v\sqrt{1-\beta^2} \frac{l_I}{c} = v\sqrt{1-\beta^2} 2L_1 \frac{k(v)}{c(\sqrt{1-\beta^2})^2} = L_1 \frac{2vk(v)}{c(\sqrt{1-\beta^2})} \quad (3.9)$$

Analogno, broj talasa na putanji od P do Z_2 i nazad iznosi:

$$v' t_{II} = v\sqrt{1-\beta^2} \frac{l_{II}}{c} = v\sqrt{1-\beta^2} 2L_2 \frac{k(v)}{c(\sqrt{1-\beta^2})^2} = L_2 \frac{2vk(v)}{c\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.10)$$

Razlika n' broja talasa na oba puta je:

$$n' = (L_1 - L_2) \frac{2vk(v)}{c\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.11)$$

Međutim, eksperiment je pokazao da nema pomaka šara kako god se menjala brzina v prema etru. Dakle, nije se menjala ni razlika broja talasa tj:

$$n = \bar{n}$$

ili

$$\frac{k(v)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = 1 \quad (3.12)$$

Određen je nepoznati faktor k i on iznosi:

$$k(v) = \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3.13)$$

Potretno je još definisati brzinu kretanja aparature, koja se može dobiti uz pomoć pretpostavke o konstantnosti brzine kretanja Sunca v_0 , orbitalne brzine Zemlje v_1 i kružne brzine Zemlje v_2 oko sopstvene ose. Ukupna brzina aparature je:

$$v^2 = v_0^2 + v_1^2 + v_2^2 + 2V_\alpha v_1 \sin(\theta_1 - \omega_1) + 2V_\beta v_2 \sin(\theta_2 - \omega_2) + 2v_1 v_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.14)$$

gde je V_α projekcija v_0 na orbitalnu ravan, V_β je projekcija v_0 na ekvatorijalnu ravan, ω_1, ω_2 su konstante povezane sa smerom v_0 a θ_1, θ_2 su uglovi koji izražavaju poziciju Zemlje u njenoj orbiti i njenu orientaciju ose u odnosu na fiksne zvezde. Razvijajući jednačinu (3.14), i zanemarujući članove β iznad drugog stepena dobijamo:

$$\begin{aligned} n &= (\Delta L / \lambda) \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \dots \right) \\ &= (\Delta L / \lambda c^2) [V_\alpha v_1 \sin(\theta_1 - \omega_1) + V_\beta v_2 \sin(\theta_2 - \omega_2)] + const \\ &= \delta n + n_0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ovde je promenljivi deo od n predstavljen sa δn a konstantni deo sa n_0 . Prepostavljamo da su V_α i V_β veliki u poređenju sa orbitalnom i kružnom brzinom v_1 i v_2 . Međutim δn treba da je proporcionalno sumi izraza za period od jedne godine i za period od jednog sideričkog dana.

Za izvođenje eksperimenta potrebno je δn učiniti što većim. Jedini faktor koji se može kontrolisati je izraz $\Delta L / \lambda$, čija je najveća moguća vrednost mera homogenosti svetlosti. Zbog različitih razloga najpodesnija svetlost kja se koristila je linija žive talasne dužine od 5461 \AA^0 . Kada je $\Delta L = 318 \text{ mm}$ (vrednost koja je konačno korišćena) dobijaju se vrlo jasne interferencione šare, i zamenom ovog u izraz (3.15) ispostavlja se da će rotacija Zemlje prouzrokovati dnevnu varijaciju od hiljadu pomeraja za 200 km/s , dok će orbitalno kretanje prouzrokovati iste varijacije u periodu od šest meseci za 300 km/s .

3.1 Rezultati testa

Namera eksperimenta kada je on bio predložen, je bila da se ispita efekat promene brzine, koji je vezan za orbitalno kretanje Zemlje a ne za rotaciono kretanje. Međutim kada je prva aparatura konstruisana, u kojoj su ogledala bila montirana u ramovima legure nikl – čelik, zaključilo se da je nemoguće eliminisati spore, nepravilne varijacije u interferentnim šarama koje bi prikrivale tražene efekte. Zbog toga je odlučeno da se skoncetrišu na moguće rotacione efekte.

Tri serije podataka su zabeležene sa ovom aparaturom (u aprilu i oktobru 1929. i januaru 1930.). Posle prekida od skoro godinu dana, tokom kojih je aparatura popravljana do svoje konačne forme, još tri serije su zabeležene u maju, julu i avgustu 1931. Isti svetlosni izvor je korišćen za svih šest serija, a to je bila linija žive talasne dužine $5461 \text{ } \text{\AA}$. Svaka serija izlagana je tokom perioda od samo nekoliko dana, a tokom tog vremena u jednačini (3.15) može se smatrati $\sin(\theta_1 - \omega_1)$ kao konstanta. Kako je θ_1 proporcionalno sa θ_2 , zagrdu prvog člana jednačine (3.15) , koju ćemo obeležiti sa $\delta\rho$ možemo zapisati kao

$$\delta\rho = a \sin(\theta_2 - \omega_2) + b\theta_2 + k' \quad (3.16)$$

gde su a, b i k' konstante, pri čemu poslednje dve uključuju bilo koju sporu uniformnu varijaciju kao što su možda rezultati zbog vibriranja u aparaturi. Izračunavajući vrednosti $\delta\rho_i$ koje odgovaraju uglu θ_i , imaćemo prema principu najmanjih kvadrata uslov da su najverovatnije vrednosti a i ω_2 sledeće:

$$a = (2/m) \sum_1^m \delta\rho_i \sin(\theta_i - \omega_2) + 2b \cos \omega_2 \quad (3.17)$$

$$\tan \omega_2 = -\sum \delta\rho_i \cos \theta_i / (\sum \delta\rho_i \sin \theta_i + mb) \quad (3.18)$$

Konstanta b se može izračunati poređenjem srednjih vrednosti $\delta\rho$ za uzastopne dane, m je broj izlaganja po jednom danu, a obično ih je 48.

Pošto ukupna brzina Zemlje može da varira tokom godine, ne više od vrednosti dva puta orbitalne brzine, verovatno je korektno da se ovi rezultati usrednje bez poređenja sa prvim članom u jednačini (3.15). Kada se to uradi amplituda rezultujuće sinusne krive je 0.06 ± 0.05 . Zamenom u jednačinu (3.15) nađeno je da ovo odgovara brzini $V_\beta = 24 \pm 19 \text{ km/s}$.

Pošto je aparatura, do svog konačnog izgleda bila stalno podešavana i prosečne vrednosti prečnika prestenova su bile skoro konstantne, bilo je vrlo jednostavno testirati da li neki efekat postoji zbog orbitalnog kretanja, tj. odrediti faktor V_α u jednačini (3.15). Direktni način određivanja V_α bi bio evidentno isti kao i za određivanje dnevnih efekata, tj. određivanjem δn za duži period tokom godine i fitovanjem podataka na krivu zahtevane forme. Umesto toga, uvedena je modifikacija procedure, da ne bi morali svi eksperimentalni uslovi da se održavaju za duže periode. Zasnovana je na prepostavci da je najverovatnija brzina promenljivog dela δn jednak izvodu prvog činioca u zagradi jednačine (3.15). Svaka od tri serije podataka, uzeta u periodu od osam dana do mesec dana i u intervalima od tri meseca, korišćena je da bi se izračunala dnevna brzina

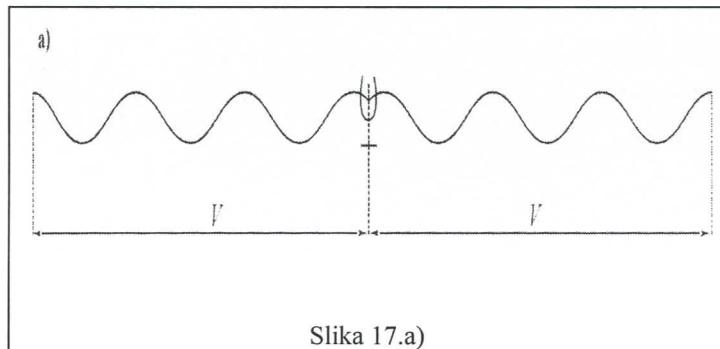
promene $\delta\rho$ u tom vremenskom periodu tokom godine. Ova brzina nađena je aritmetičkim usrednjavanjem očitanih podataka tokom svakog dana date serije i određivanjem krive, putem metode najmanjih kvadrata, koja je verovatno bila prava linija reprezentovana tim podacima. Najverovatnija sinusna kriva koja je odgovarala tim izvodima bila je sračunata. Tri serije obuhvataju nekih 300 izlaganja.

Tri izračunate promene brzine su bile 0.050 ± 0.020 , 0.007 ± 0.013 , 0.015 ± 0.021 , sve su izražene u hiljaditom delu pomeraja po danu. Sračunata sinusna kriva ima amplitudu od 2.69 hiljaditog dela i to odgovara brzini od $V_\alpha = 15 \pm 4 \text{ km/s}$. Pošto se relativno mala moguća greška, zasnovana samo na unutrašnjoj konzistenciji podataka treba uzeti veoma ozbiljno, ovaj rezultat se teško može smatrati kao pokazatelj prave brzine. Kako je korišćeno samo 300 izlaganja u primeni ovog metoda, evidentno je da se tačnost može povećavati putem velikog faktora ako su podaci uzeti postojano tokom nekoliko meseci.

Ako su poslednji rezultat i onaj uzet za rotacioni efekat kombinuju vektorski (ignorišući razliku smerova V_α i V_β) njihov rezultat je $10 \pm 10 \text{ km/s}$. Pošto je poznato da je među maglinama relativna vrednost brzine reda veličine hiljaditog dela kilometara po sekundi, ovo se teško može smatrati kao nešto drugo izuzev kao jasan nula rezultat; istog je reda veličine kao tačnost MM eksperimenta. Zaključak koji se izvlači je da frekvencija spektralne linije varira na način koji zahteva relativnost. Čini se da je ovo jedino istraživanje u kojem kvantni fenomen, potvrđuje Ajnštajnovu teoriju.

4. Eksperiment Iva i Stilvela

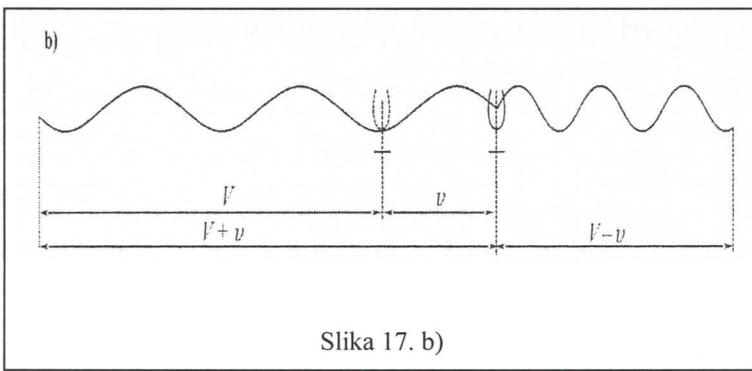
Da bismo opisali eksperiment Ivesa i Stilvela potrebno je prisetiti se Dopplerovog efekta. Ako proleti avion na maloj visini iznad naše glave, čućemo promenu visine tona koju proizvodi motor aviona. Dok nam se avion približava, ton je viši a kada on odlazi ton je dublji. Da bismo razumeli tu pojavu, prvo ćemo objasniti šta se dešava sa širenjem zvuka. Na slici 17.a) nacrtana je viljuška koja vibrira nekom frekvencijom ν i odašilje ton određene visine. Recimo, da je viljuška počela da vibrira u trenutku $t = 0$, a razmatramo stanje koje je nastalo nakon jedne sekunde.



Ako je V brzina širenja zvuka, zvuk se na obe strane za vreme t proširio na udaljenost Vt . U tom vremenu odaslan je νt talasa, jer je ν broj vibracija u jedinici vremena. Ako označimo talasnu dužinu sa λ biće prema tome

$$V = \lambda \cdot \nu \quad (4.1)$$

Uzmimo sada u obzir slučaj kad se viljuška kreće brzinom v nadesno (slika 17.b). Tada je prvi talas krenuo iz početnog položaja viljuške brzinom V i nakon jedne sekunde dospeo nadesno i nalevo do istog mesta kao pre.



Kada je poslednji talas odaslan, viljuška je za dužinu vt po-maknuta nadesno, a ukupno je odaslala νt talasa nadesno i nalevo. Talasi su sada na desnoj strani zbijeni na dužini

$(V - v)$, dok su na levoj strani rastegnuti na dužinu $(V + v)$. Talasna dužina je stoga desno manja, a levo veća nego pre. Označićemo te talasne dužine sa λ_1 i λ_2 . Tada će biti:

$$V - v = \lambda_1 n, \quad V + v = \lambda_2 n \quad (4.2)$$

Treba razlikovati frekvenciju viljuške v , koja je ista kao i pre, od frekvencije tih talasa. Naime frekvencija viljuške koja se kreće jeste broj talasa koje onda odašilje u sekundi, a frekvencija v_1 i v_2 desnih, odnosno levih talasa znače broj talasa koji prođu u jedinici vremena jednom nepomičnom tačkom. Međutim, između frekvencija talasa, brzine širenja i dužine talasa važi uvek relacija (4.1) koja sada glasi:

$$V = \lambda_1 n_1, \quad V = \lambda_2 n_2 \quad (4.3)$$

Za desne, odnosno leve talase, iz jednačine (4.2) i (4.3) sledi:

$$v_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \frac{V}{\frac{V-v}{v}} = \frac{V}{V-v} \cdot v \quad (4.4)$$

$$v_2 = \frac{V}{\lambda_2} = \frac{V}{\frac{V+v}{v}} = \frac{V}{V+v} \cdot v \quad (4.5)$$

Vidimo da je $v_1 > v$, jer je $V/(V-v) > 1$ dok je $v_2 < v$, jer je $V/(V+v) < 1$. Desni talasi koje čovek prima kada mu se viljuška približava čuće se dakle kao viši tonovi, a levi talasi koje čovek prima kada se viljuška udaljava, daju dublje tonove. Formule (4.4) i (4.5) izražavaju zakonitosti te pojave koja se naziva Doplerov efekat.

Pri izvođenju ovih formula, razmatrano je stanje vazduha koji miruje. Kao što je vazduh smatrana prenosnikom zvučnih talasa, tako se etar smatra prenosnikom svetlosnih talasa. Ukoliko se kreće izvor svetlosti frekvencije v brzinom v prema etru, svetlosni talasi, koje svetlost odašilje ispred sebe, će imati frekvenciju u odnosu na posmatrača koji miruje prema etru:

$$v_1 = \frac{c}{c-v} v = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} v = \frac{1}{1 - \beta} v \quad (4.6)$$

a oni koje odašilje iza sebe:

$$v_2 = \frac{c}{c+v} v = \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} v = \frac{1}{1 + \beta} v \quad (4.7)$$

sada je umesto V napisano c jer je to brzina širenja svetlosti.

Ukoliko hoćemo iste odnose da izrazimo preko talasnih dužina, moramo uzeti u obzir jednačinu (4.3) koja će sada glasiti:

$$c = \lambda_1 v_1, \quad c = \lambda_2 v_2 \quad (4.8)$$

ili

$$\lambda_1 = \frac{c}{v_1}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{v_2} \quad (4.9)$$

Ako uvrstimo ove izraze u (4.6) i (4.7) i umesto v napišemo c/λ dobijamo:

$$\lambda_1 = \lambda(1 - \beta), \quad \lambda_2 = \lambda(1 + \beta) \quad (4.10)$$

Ova relacija predstavlja relativistički Doplerov efekat. Takođe postoji i trasnverzalni Doplerov efekat, koji predstavlja potpuno relativistički rezultat. Naime, ako se izvor i posmatrač kreću duž paralelnih pravih, u trenutku njihovog najvećeg približenja prijem talasa se dešava pod uglom $\theta = \pi/2$, tako da će frekvenci koju registruje posmatrač biti niža od od sopstvene frekvencije izvora. Transverzalni Doplerov efekat ima jednostavno obajšnjene na osnovu dilatacije vremena. Ives i Stilvel su eksperimentima utvrdili postojanje upravo ovog trasverzalnog efekta koji je kasnije više puta potvrđivan sa poboljšanom tačnoću merenja.

4.1 Postavka eksperimenta

Transverzalni Doplerov efekat je prvi put viđen spektroskopski u eksperimentu Iv-a i Stilvel-a (H. E. Ives ; G. R Stilwell) 1939. godine. Međutim, ideja da se Doplerov efekat za svetlost koja potiče iz Zemljskih izvora posmatra putem kanalskih zraka, potiče još od Goldštajna (E. Goldstein 1886.). Princip je sledeći: za izvor svetlosti potrebno je uzeti brze čestice koje svetle, te čestice bi bile na primer katodni zraci tj. elektroni koji izlaze iz katode u evakuisanoj cevi. Međutim elektroni ne zrače spektralne linije. Elektroni se sudsaraju sa molekulima razredenog gasa koji se nalazi u cevi, pa pri tome izbacuju po koji elektron iz tih molekula. U ostatku takvih molekula preovladavaju pozitivni naboji atomskih jezgara, pa su molekuli stoga pozitivno nabijene čestice, pozitivni joni. Katoda tj. negativni pol privlači jone i ako se u katodi probuše rupe ili "kanali" joni prolaze kroz kanale pa se pojavljuju s one strane katode kao kanalski zraci. Takve čestice svetle, zrače spektralne linije, pa ako se iza cevi namesti spektroskop može se ustanoviti spektar svetlosti koji te čestice odašilju. U spektru kanalskih zraka mogu se videti i spektralne linije brzih i sporih jonizovanih molekula i brzih i sporih neutralnih molekula. Mogu se dakle uporediti linije koje odašilju nepomični molekuli sa linijama koje odašilju brzi molekuli. Linije u spektru su razdvojene: jedna linija svakog takvog para odgovara svetlosti približno nepomičnih molekula, a druga je nešto pomaknuta prema ljubičastom kraju spektra i potiče od brzih molekula. Tako se zapaža Doplerov efekat, a razlika talasnih dužina jednostavno se meri.

Zaključak

Kroz ovaj rad upoznali smo se sa istorijskim razvojem nauke o prostoru i vremenu. Sledili smo njen postanak iz prvih fizičkih teorija, i zapazili da jasno vidljiv proces objektivizacije i relativizacije vodi zamršenim putevima istraživanja, koja se danas ogleda u temeljnim pojmovima egzaktne prirodne nauke.

Da bi neka teorija bila validna potrebno je tesirati njene postulate kao i posledice. Dokazi koji su dobijeni na osnovu eksperimenata potvrđuju osnovne principe STR. Ti eksperimenti su sledeći:

- 1.Majkelson - Morljev eksperiment - testirao izotropiju brzine svetlosti u sistemima koji se kreću; brzina svetlosti je nezavisna od smera prostiranja
- 2.Kenedi - Torndajk eksperiment - test nezavisnosti brzine svetlosti od brzine izvora ili laboratorije
- 3.Iv i Stilvel eksperiment - test dilatacije vremena (Doplerov efekat).

Prva dva eksperimenta su dala nula rezultat, što znači da oni u potpunosti potvrđuju princip konstantnosti brzine svetlosti, dok poslednji eksperiment potvrđuje dilataciju vremena. Na osnovu ova tri eksperimenta potvrđena je Lorencova kontrakcija dužina i dilatacija vremena. Samim tim došlo se do novog poimanja vremena i prostora i do validnosti postulata specijalne teorije relativnosti.

Kao teorija vremena i prostora, STR se ne može smatrati isključivo kao fizička, matematička ili uopšte teorija jedne nauke. Ona obuhvata i problematiku običnog čoveka, a ne samo stručnjaka. Zato se o prihvatanju i usvajanju takve teorije ne može u potpunosti suditi prema stavu fizičara, matematičara nego čak i prema najširim krugovima ljudi koji razmišljaju i žele da shvate takva pitanja.

Klasična tretiranja fizičkih pojava i veličina, iako dovode do rezultata ekvivalentnih relativističkim, ne mogu se smatrati kao nešto što bi prevazišlo teoriju relativnosti. Naravno treba očekivati da će i teorija relativnosti jednog dana biti prevaziđena, ali za sada se ne može reći da ju je prevazišla neka druga teorija, naročito kada prednjače teorije koje su zasnovane kao logička celina sa odgovarajućim međusobno povezanim osnovama uz obavezno slaganje sa savremenim eksperimentanim rezultatima.

Literatura:

1. Dr Vida Žigman "Specijalna teorija relativnosti" Beograd, 1997. godine
2. Danilo Blanuša "Teorija relativnosti" Školska knjiga, Zagreb 2003. godine
3. M. Born "Einsteinova teorija relativnosti" Zagreb, 1948. godine
4. Dr inž Dragiša M. Ivanović "O teoriji relativnosti" Zavod za izdavanje udžbenika narodne republike Srbije, Beograd, 1962. godine
5. Michel Janssen and John Stachel "The Optics and electrodynamics of moving bodies" Max Planck Institute for the History of Science, 2004.
6. A. Michelson and E. W. Morley "On the relative motion of the Earth and the luminiferous Ether" American Jornal of Science, vol. XXXIV, No. 203-november, 1887.
7. M. Consoli and E. Constanzo "The Michelson Morley experiment and the cosmic velocity of the Earth" physics/0311054v1, 13. nov. 2003.
8. Paulo N. Correa and Alexandar N. Correa, Hon B. A "Consequences of the null result of the Michelson - Morley expetiment: the demise of the stationary aether, the rise of special relativity and the heuristic concept of photone" Aurora biphysics research institute, 2000.
9. Roy J. Kennedy and Edward M. Thorndike "Experimental establishment of the relativity of time" Physical Review, vol. 42, november 1, 1932.
10. D. Hils and J. L. Hall "Improved Kennedy – Thorndike experiment to test Special relativity" Physical Review Letters , vol. 64 , no. 15 , 9.april 1990.

Kratka biografija



Ivana Mezei rođena je 27.09.1984. godine u Zrenjaninu. Posle završene osnovne škole upisala gimnaziju "Zrenjaninska Gimnazija" u Zrenjaninu. Po završetku gimnazije, školovanje nastavila u Novom Sadu na Prirodno – matematičkom fakultetu na odseku za fiziku, smer astronomija sa astrofizikom. 2007. godine položila je sve ispite koji su bili predviđeni programom za studijsku grupu astronomija i time stekla uslov da brani diplomski.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JL

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Ivana Mezei

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2007.

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

4/30/17/10/0

Fizika

Specijalna teorija relativnosti

Najvažniji testovi specijalne teorije relativnosti pre Drugog svetskog rata

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

Specijalna teorija relativnosti zasniva se na dva fundamentalna principa. Validnost tih principa i same teorije ispitana je putem nekoliko ogleda, koji su u ovom radu objašnjeni.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

20.11.2007.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Milan Pantić, vanredni profesor PMF, Novi Sad

član:

dr Milica Pavkov – Hrvojević, docent PMF, Novi Sad, mentor

član:

dr Svetlana Lukić, redovan profesor PMF, Novi Sad

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Monograph publication

TR

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Ivana Mezei

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2007.

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

4/30/17/10/0

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Special theory of relativity

SD

Subject/ Key words:

The main tests of special theory of relativity before Second World War

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

Special theory of relativity is based on two fundamental principles. The validity of those principles and the theory itself has been examined through several experiments which are explained in this study.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

20.11.2007.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Milan Pantić, Ph. D., associated professor, "Faculty of Natural Sciences – Department of Physics ", Novi Sad

Member:

Milca Pavkov – Hrvojević, assistant professor " Faculty of Natural Sciences – Department of Physics ", Novi Sad, supervisor

Member:

Svetlana Lukić, Ph. D., full professor, " Faculty of Natural Sciences – Department of Physics ", Novi Sad