

Višnja Henč-Bartolić

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, HR-10000 Zagreb
visnja.henc@fer.hr

Boškovićev dalekozor s vodom i Lopašićevo objašnjenje

Sažetak

U osamnaestom stoljeću Bošković je želio iznaći da li je svjetlo val ili čestica. Stoga je sugerirao pokus u kojemu treba napuniti dalekozor vodom i time pronaći promjene iznosa aberacije zvijezde. Stotinu godina kasnije Sir Airy (1871.) je izveo eksperiment, ali s negativnom rezultatom. Lopašić je to objasnio pomoću Einsteinova principa specijalne relativnosti.

Ključne riječi

specijalna teorija relativnosti, Boškovićev *Gedankenexperiment*, valna ili korpuskularna teorija, Airyjevev eksperiment, Lopašićevo objašnjenje

Predgovor

Klasična teorija relativnosti temelji se na Galilejevim transformacijama. Dva prostora gibaju se jedan prema drugom, što ima za posljedicu da su prostorne koordinate međusobno povezane transformatorskim pravilima, dok vrijeme teče jednako u svakom prostoru. Međutim, pokuse – naročito rezultat Michelson-Morleyjeva pokusa s kraja 19. stoljeća s Michelsonovim interferometrom – protumačio je Albert Einstein (1905.). Postulirao je da je brzina svjetlosti u vakuumu jednaka u svim inercijelnim referentnim prostorima i da ne ovisi o gibanju izvora ili detektora svjetlosti. Ta je eksperimentalna činjenica prvi postulat specijalne teorije relativnosti, tzv. princip konstantnosti brzine svjetlosti. Stoga, umjesto Galilejeve transformacije koriste se relativističke Lorentzove transformacije. Umjesto klasične mehanike, dobivamo općenitiju relativističku mehaniku koja u aproksimaciji *v*«*c* prelazi u klasičnu [1].

U priloženom tekstu želimo ukazati na jedan raniji pokus, Boškovićev dalekozor s vodom iz osamnaestog, odnosno devetnaestog stoljeća, koji se također tumači postulatom specijalne teorije relativnosti.

Uvod

Ruđer J. Bošković (1711.–1787.) hrvatski je isusovac, matematičar i prirodoslovac koji je u djelu *Theoria Philosophiae Naturalis* (1758.) prvi dao opis u kojem su elementi tvari pojedinačne točke »atomi«, nedjeljivi i neprotežni. Oni su centri sila čije se djelovanje mijenja s udaljenosti. Boškovićevi su se radovi pojavili mnogo ranije od stoljeća u kojem je rođena moderna atomska teorija. Pored toga, poznati su njegovi doprinosi u području optike [2–5]. Tako je pokušao riješiti dvojbu da li je svjetlost val ili korpuskula. Kako bi pronašao odgovor, predložio je da se cijev teleskopa napuni vodom. Očekivao

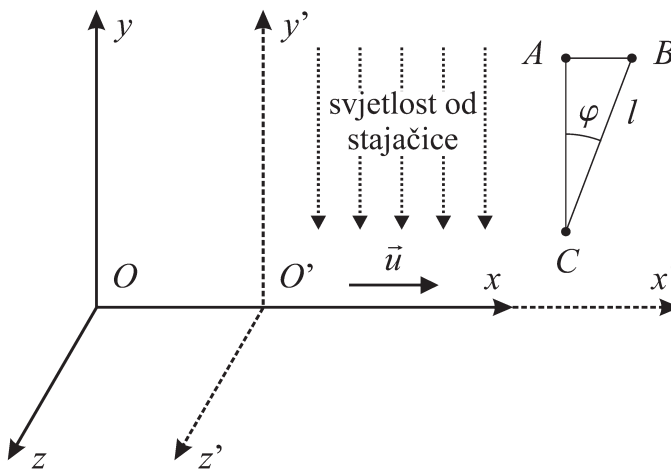
je da će se vidjeti promjena kuta aberacije zvijezde stajačice. Naime, brzina svjetlosti jest manja ako putuje kroz vodu kao val, a time je i kut aberacije veći nego u zraku (vakuumu). Naprotiv, kut je manji ako svjetlost putuje kroz vodu kao korpuskula. Nažalost, Bošković nije imao prilike izvesti pokus. Otprilike jedno stoljeće nakon objavljivanja Boškovićeve sugestije, koja je usput bila i zaboravljena [6], pokus je izveo Sir Airy (1871.). Međutim, nije se vidjela promjena aberacije zvijezde stajačice, unatoč preciznim mjerenjima. Lopašić [7] objašnjava ovaj negativni ishod pokusa pomoću specijalne teorije relativnosti.

Prije nego što se osvrnemo na to objašnjenje, treba reći da je među prvim našim znanstvenicima koji su studirali Boškovićeve radove bio Vinko Dvořák. Posebno treba istaknuti *Rad JAZU* tiskan 1887. i 1888. godine [8], posvećen životu i ocjeni djela R. J. Boškovića, u spomen prve stogodišnjice njegove smrti. U knjizi je, između ostalih, uzeo učešće i V. Dvořák s radom »Boškovićev rad na polju fizike«, te J. Torbar s radom »Bošković i njegov rad na polju astronomije i meteorologije«. Upravo Torbar govori o Boškovićevom zamišljenom eksperimentu s dalekozorom s vodom. On ističe da je astronom Klinkerfues diskutirao o aberaciji zvijezde stajačice na temelju Boškovićeve ideje, držeći se valne teorije. Rad je objavljen 1867. godine u Leipzigu pod naslovom *Die Aberration der Fixsterne nach der Wallentheorie*. Od istog autora danas se može naći članak o Boškovićevu pokusu iz 1869. godine [9], dakle, nešto ranije od izvedenog Airyjeva pokusa.

Vratimo se sad objašnjenju V. Lopašića.

Klasična mehanika

Sunce i zvijezda stajačica su u mirnom sustavu *Sunčevog prostora* ($x, y, z, t=t'$), dok se dalekozor nalazi na Zemlji u pokrenutom sustavu ($x', y', z', t'=t$) s brzinom \vec{u} ($u=29,8$ km/s) koja pada u pozitivni smjer osi x .



Dva inercijalna sustava. Kut aberacije φ zvijezde stajačice.

U točki A *Sunčevog prostora* ulazi zraka svjetlosti u dalekozor i putuje do točke C kroz vrijeme t , dok se dalekozor pomakne na duljini $\overline{AB} = ut$. Gledano sa Zemlje zvijezda se vidi na pravcu \overline{BC} . Kut aberacije zvijezde φ računamo kao:

$$\operatorname{tg} \varphi = \overline{AB} : \overline{AC}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{c}$$

Uz brzinu svjetlosti u vakuumu, $c = 3,00 \cdot 10^5$ km/s, kut aberacije je malen.

$$\varphi = 20,5'$$

Na Zemlji u jednako vrijeme svjetlo prođe duljinom dalekozora l , pa izlazi (prema slici):

$$l = (\overline{AC}^2 + \overline{AB}^2)^{1/2} > \overline{AC},$$

što znači da motritelj na Zemlji mjeri za svjetlost koja putuje praznim dalekozorom brzinu veću od c , što je protivno iskustvu.

Svjetlost se na Zemlji širi u vakuumu u svim smjerovima jednako brzo, pa nema razloga da bi u određivanju smjera kojim zrake svjetlosti putuju, ovisilo i o tome idu li one kroz sredstvo u cijevi dalekozora brže ili sporije od brzine u vakuumu.

Stoga, po principu relativnosti, valja očekivati negativan ishod Boškovićeve pokusa.

Evo kako to Lopašić [7] dokazuje primjenom specijalne teorije relativnosti.

U Sunčevom sustavu (x, y, z, t) , prema slici, brzina svjetlosti ima komponente:

$$\frac{dx}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = -c, \frac{dz}{dt} = 0.$$

Da se dobije iznos i smjer brzine svjetlosti u sustavu Zemlje služi se *Lorentzovim relativističkim relacijama* koje glase:

$$x = a(x' + u \cdot t')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = a\left(t' + \frac{u}{c^2} x'\right)$$

uz

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Ovdje je, kako je već rečeno, u brzina kojom se Zemlja giba u Sunčevu prostoru. Diferenciranjem formula dobiva se:

$$dx = a(dx' + u \cdot dt')$$

$$dy = dy'$$

$$dz = dz'$$

$$dt = a\left(dt' + \frac{u}{c^2} dx'\right).$$

Omjerom diferencijala nalaze se za motritelja na Zemlji komponente brzine kojom svjetlost putuje kroz vakuum od neke stajačice u Sunčevu prostoru pravcem okomitim na brzinu u kojom se giba Zemlja u taj čas. Komponente glase:

$$\begin{aligned}\frac{dx'}{dt'} &= -u \\ \frac{dy'}{dt'} &= -\frac{c}{a} \\ \frac{dz'}{dt'} &= 0.\end{aligned}$$

Kut što ga zrake svjetlosti zatvaraju sa smjerom koordinatne osi y' , to jest kut aberacije, određen je izrazom:

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{dx'}{dy'} = a \frac{u}{c}.$$

Kako je brzina $v \ll c$ brzine svjetlosti, vrijedi približnost:

$$\varphi' = a \frac{u}{c}.$$

Vidi se da relativističke transformacije daju vrijednost kuta aberacije koji se praktički ne razlikuje od one izvedene na osnovi klasičnih Galilejevih transformacija, jer se faktor a malo razlikuje od jedan.

Sljedeće što se može naći jest nalaženje iznosa brzine koju mjeri motritelj na Zemlji, za svjetlost koja dolazi sa neke stajačice. Budući da je

$$v^2 = \left(\frac{dx'}{dt'}\right)^2 + \left(\frac{dy'}{dt'}\right)^2 + \left(\frac{dz'}{dt'}\right)^2,$$

to se uvrštavanjem vrijednosti dobiva:

$$\begin{aligned}v^2 &= u^2 + c^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) \\ v^2 &= c^2.\end{aligned}$$

Zaključuje se da motritelj na Zemlji dobiva za brzinu svjetlosti koja je došla od neke zvijezde, dakle izvanzemaljskog izvora, jednaku vrijednost kakvu bi dobio i opažatelj u prostoru u kojem Sunce miruje. To je činjenica koja je poslužila kao polazište pri pronalaženju relativističkih transformacija i objašnjava negativni ishod Airyjeva pokusa.

Literatura

- [1] Petar Kulišić, *Mehanika i toplina*, Školska knjiga, Zagreb 1995.
- [2] P. R. J. Boscovich S. J., *De Annuis Fixarum aberrationibus*. Dissertatio habita in Collegio Romano Societatis Jesu (Komarek). [Naslov preuzet iz prijevoda s latinskog djela: Josip Ruđer Bošković, *Teorija prirodne filozofije*, Liber, Zagreb 1974.]

- [3] Stanko Hondl, »Boškovićev dalekozor s vodom«, u: *Almanah Bošković*, Zagreb 1952., str. 187–227.
- [4] Stanko Hondl, »Boškovićev dalekozor s vodom (dodatak)«, u: *Almanah Bošković*, Zagreb 1953., str. 81–91.
- [5] Žarko Dadić, *Ruđer Bošković*, Školska knjiga, Zagreb 1990.
- [6] Walter van der Kamp, *De Labore Solis. Airy's Failure Reconsidered*, www.geocentricity.com.
- [7] Vatroslav Lopašić, *Boškovićev pokus. Predavanja iz fizike*, Školska knjiga, Zagreb 1979., str. 196–206.
- [8] *Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti*, knjige 87, 88, 90, Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti, Zagreb 1887.–1888.
- [9] Wilhelm Klinkerfūs, »Über des Boscovich'schen Versuch«, u: *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg-Augusts-Universität zu Göttingen*, 1/1869, str. 117
[<http://dz-srv1.sub.uni-goettingen.de/sub/digbib/loader?ht=VIEW&did=D53414>].

Višnja Henč-Bartolić

Bošković's Water-filled Telescope and Lopašić's Explanation

Abstract

In 18th century Bošković tried to find out if light is wave or corpuscle. Therefore, he suggested to fill a telescope with water to test alteration in the amount of stellar aberration. Hundred years later, Sir Airy (1871) had done this experiment, but with negative result. Lopašić had explained it by means of Einstein's principle of the special relativity.

Key words

special theory of relativity, Bošković's *Gedankenexperiment*, wave or corpuscular theory, Airy's experiment, Lopašić's explanation