

OB DVESTOLETNICI ARAGOJEVEGA POSKUSA

JANEZ STRNAD

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

PACS: 07.50.Hp, 01.65.+g

François Arago je leta 1810 poskusil izmeriti, kako se hitrost svetlobe spremeni zaradi gibanja Zemlje. To je bil prvi v vrsti podobnih neuspešnih poskusov. Ob dvestoletnici se zdi vredno opisati Aragojev poskus in osvetliti Aragojevo izhodišče. Da bi pojasnil izid poskusa, je Augustin Fresnel uvedel zamisel, da del etra sledi gibanju telesa. Dodanih je nekaj podatkov o Aragojevem življenju in delu.

AT THE BICENTENARY OF ARAGO'S EXPERIMENT

François Arago in 1810 tried to measure the change of the light velocity due to the motion of the Earth. This was the first in a series of similar unsuccessful experiments. At the bicentenary it appears worthwhile to describe Arago's experiment and to elucidate Arago's starting point. To explain the outcome of the experiment Augustin Fresnel introduced the idea of aether drag. Some facts of Arago's life and work are added.

Isaac Newton naj bi z *Optiko* leta 1704 in s svojim ugledom povzročil, da je v 18. stoletju prevladala delčna slika svetlobe. V njej so curek svetlobe opisali z množico zelo hitrih delcev. Upoštevati pa kaže, da vsi sodobniki te slike niso sprejeli in tudi tisti, ki so jo sprejeli, niso vsi mislili na točkaste delce. V optiki, ki je v razvoju precej zaostajala za mehaniko, so uvajali in preizkušali le delne zamisli. Večinoma so sledili Newtonu v prepričanju, da prozorna snov privlači svetlobne delce in se zato ti v njej gibljejo hitreje kot v praznem prostoru.

Tako so pojasnili, da se curek delcev pri prehodu iz zraka v prozorno snov lomi proti vpadni pravokotnici. Privzeli so, da se ob lomu poveča na mejo pravokotna komponenta hitrosti, komponenta, vzporedna z mejo, pa se ohrani. Iz enačbe $c_{1\parallel} = c_{2\parallel}$ ter enačb $c_1^2 = c_{1\parallel}^2 + c_{1\perp}^2$ in $c_2^2 = c_{2\parallel}^2 + c_{2\perp}^2 = c_{1\parallel}^2 + c_{2\perp}^2$ sledi:

$$c_{2\perp}^2 = c_{1\perp}^2 + c_2^2 - c_1^2. \quad (1)$$

Iz prve enačbe je izhajal tudi lomni zakon $c_1 \sin \alpha = c_2 \sin \beta$ z vpadnim kotom α in lomnim kotom β v obliki, ki jo je izpeljal René Descartes leta 1637.

Leta 1810 se je Arago lotil opazovanja zvezd. Tedaj je še stavil na delčno sliko. Po opazovanju zvezdne aberacije so poznali hitrost svetlobe. James Bradley je ugotovil, da zvezde v bližini pola ekliptike v letu dni na nebu

opišejo krožec s kotnim polmerom približno $20''$. Leta 1729 je to pojasnil z razmerjem med hitrostjo Zemlje pri gibanju okoli Sonca $v = 30 \text{ km/s}$ in nanjo pravokotno hitrostjo svetlobe c . Iz enačbe $v/c = 20'' = 10^{-4}$ je sledilo $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Arago je pričakoval, da se vsi delci svetlobe z zvezd na Zemlji ne gibljejo z enako hitrostjo. Zemlja se kaki zvezdi zdaj približuje, čez šest mesecev pa se zaradi gibanja okoli Sonca od nje oddaljuje. (Hitrost zaradi vrtenja Zemlje meri na ekvatorju $0,45 \text{ km/s}$, drugod je manjša.) Ker naj bi bil lomni kot odvisen od hitrosti svetlobe glede na prozorno snov, ki miruje na Zemlji, je meril spomladi in merjenje ponovil jeseni¹ [1]. Pri spomladanskih poskusih 19. in 27. marca 1810 je uporabil akromatično prizmo z lomečim kotom 24° . Sestavlil jo je iz prizem iz kronskega in flintskega stekla, ki ju je zlepil s prozornim lepilom in vpel v vrtljivo ogrodje. Z zidnim teleskopom, vrtljivim v ravnini pariškega poldnevnikarja, je izmeril zenitni kot številnih svetlih zvezd, ko so šle prek tega poldnevnikarja. Kot je meril neposredno in po prehodu svetlobe skozi prizmo, ki jo je lahko zasukal pred objektiv ali umaknil.

19. marca 1810			27. marca 1810		
čas	zvezda	izmerjeni odklon	čas	zvezda	izmerjeni odklon
18:10	Rigel	$10^\circ 04' 24,2''$	18:18	Betelgeza	$10^\circ 04' 33,28''$
20:28	Kastor	$10^\circ 04' 24,6''$	19:55	Kastor	$10^\circ 04' 27,93''$
20:35	Prokion	$10^\circ 04' 24,9''$	20:02	Prokion	$10^\circ 04' 32,31''$
23:02	Regul	$10^\circ 04' 25,2''$	02:39	Arktur	$10^\circ 04' 28,05''$
05:22	Antares	$10^\circ 04' 22,5''$	04:49	Antares	$10^\circ 04' 28,19''$

Pri jesenskem merjenju 8. oktobra 1810 je uporabil boljšo in večjo prizmo, ki jo je pritrdil pred objektiv tako, da je pokrivala polovico vidnega polja. Prva mejna ploskev prizme je bila pravokotna na os teleskopa. Teleskop je bil vrtljivo nameščen v delilnem krogu v poldnevniški ravnini. Najprej ga je usmeril tako, da je pri opazovanju v prvem vidnem polju slika zvezde nastala na osi. Potem je teleskop zasukal, da je prišla na os slika zvezde pri opazovanju v drugem vidnem polju. Sicer pa je bil Arago dokaj skop s podatki.

Razlika izmerjenih zenitnih kotov s prizmo in brez nje mu je dala odklon zaradi loma v prizmi. Dobljene izmerke je zbral v treh preglednicah s po 12, 15 in 8 podatki. Tukaj navedemo le po pet značilnih. Dodali smo še podatke za lokalni čas, v katerem so zvezde prešle pariški poldnevnikar [2]. Zanimivo je, da je v prvi preglednici navedel odklon na desetino kotne sekunde natančno, v drugi celo na stotino kotne sekunde natančno, v tretji pa le na

¹Zanimivo je, da je predavanje iz decembra 1810 moralo 43 let čakati na objavo v *Zbranih delih akademije*.

8. oktobra 1810		
čas	zvezda	izmerjeni odklon
19:26	Atair 4	22° 25' 09''
04:08	Aldebaran	22° 25' 00''
04:48	Rigel	22° 24' 59''
05:28	α Oriona	22° 25' 02''
06:19	Sirij	22° 25' 08''

kotno sekundo natančno. Najbrž je pri jesenskem merjenju s ponavljanjem ugotovil, da je napaka pri merjenju večja od desetine kotne sekunde. Razlike med odkloni so se zmanjšale, ko se je od merjenja do merjenja izboljšala natančnost. Pričakoval je, da bo odklon odvisen od smeri relativne hitrosti prizme glede na zvezdo in da bodo razlike dosegle velikostno stopnjo 20''. Po merjenjih pa ni mogel zaslediti nič podobnega. Zato je sklepal, da ni take odvisnosti in je majhne razlike med odkloni pripisal napakam pri merjenju.

Zapisal je: „Ta rezultat [...] se zdi v očitnem nasprotju z Newtonovo teorijo loma, ker resnična neenakost v hitrosti žarkov ne povzroči resnične neenakosti v odklonih [...]. Zdi se celo, da je lahko smiselna le, če privzamemo, da sveteča telesa sevajo žarke z vsemi vrstami hitrosti, če hkrati privzamemo, da so ti žarki vidni samo, če ležijo njihove hitrosti znotraj danih meja. Ker je po tem privzetku resnična vidnost žarkov odvisna od njihovih relativnih hitrosti in ker prav te hitrosti določajo izdatnost loma [odklon], se vidni žarki vedno enako lomijo.“ [1] Nepričakovani izid merjenj je torej pojasnil z nenavadnim privzetkom. Zvezda seva delce z zvezno porazdeljenimi hitrostmi glede na zvezdo, oko pa zazna samo delce s hitrostjo glede na oko na ozkem pasu. Pri lomu na prizmi se sicer spremeni hitrost delcev, kakor zahteva račun v okviru delčne slike. Vendar oko tudi po prehodu svetlobe skozi prizmo zazna samo delce na danem ozkem pasu hitrosti, ti pa se lomijo enako.

Vzemimo dve sestavini svetlobe z različnima hitrostma c_1 in c'_1 . Ker obe sestavini prihajata iz dane smeri, velja $c_{1\perp}/c_{1\parallel} = c'_{1\perp}/c'_{1\parallel}$. Iz enačb (1) za obe sestavini izhaja:

$$c_{2\perp}^2/c_{2\parallel}^2 = (c_{1\perp}^2 + c_2^2 - c_1^2)/c_{1\parallel}^2 = c_{1\perp}^2/c_{1\parallel}^2 + (c_2^2 - c_1^2)/c_{1\parallel}^2,$$

$$c_{2\perp}'^2/c_{2\parallel}'^2 = (c_{1\perp}'^2 + c_2'^2 - c_1'^2)/c_{1\parallel}'^2 = c_{1\perp}'^2/c_{1\parallel}'^2 + (c_2'^2 - c_1'^2)/c_{1\parallel}'^2.$$

Ker je $c_{1\parallel} \neq c'_{1\parallel}$, je tudi $c_{2\perp}/c_{2\parallel} \neq c'_{2\perp}/c'_{2\parallel}$ celo, če bi veljalo $c_2^2 - c_1^2 = c_2'^2 - c_1'^2$. Lomna kota sestavin z različnima hitrostma iz dane smeri se v splošnem med seboj razlikujeta. Če pa hitrosti c_1 in c_2 ležita na dovolj ozkem pasu, ki ga sprejemajo oči, in je $c_1 \approx c'_1$ ter $c_2 \approx c'_2$, je ta razlika zelo majhna. Privzetek je oprl tudi na spoznanje, da ne vidimo infrardeče svetlobe, ki jo je odkril

William Herschel leta 1800, in ultravijolične, ki jo je odkril Johann Ritter leto pozneje.



V prvih letih 19. stoletja je Thomas Young začel širiti misel, da je svetloba valovanje. S tem je oživil sliko Christiaana Huygensa iz leta 1678, ki pa je bolj kot na valovanje mislil na potovanje motenj. Huygens je izpeljal lomni zakon v današnji obliki $c_2 \sin \alpha = c_1 \sin \beta$. To obliko je izpeljal Pierre Fermat že leta 1662 z načelom najkrajšega časa.

Zaradi težav delčne slike se je Arago postopno ogrel za Youngovo valovno sliko. Na poti do tega je leta 1811 pojasnil Newtonove kolobarje z interferenco in naslednje leto odkril krožno polarizacijo. Leta 1815 je podprl zapis, v katerem je Augustin Fresnel svetlobo obravnaval kot valovanje. Naslednje leto je dokončno opustil delčno sliko in se razšel z Jean-Baptistom Biotom, ki je vztrajal pri njej. Tega leta je skupaj s Fresnelom ugotovil, da curka svetlobe, ki sta polarizirana v pravokotnih smereh, ne dasta značilne interferenčne slike, čeprav izvirata iz istega svetila.

Svetlobo so obravnavali kot mehanično nihanje delov *etra*. Najprej so mislili, da je svetloba longitudinalno valovanje [3]. Eter naj bi nosil svetlobo, kot zrak nosi zvok. Da bi pojasnil polarizacijo, je Young domneval, da valovanje sestavlja tudi majhna primes transverzalnega valovanja. Arago je Youngovo domnevo sprejel in z njo seznanil Fresnela. Ta je privzel, da je svetloba samo transverzalno valovanje in zamisli dal matematično obliko. Transverzalno valovanje lahko potuje le po trdni snovi. Misel, da je svetloba transverzalno valovanje in da pri gibanju po trdnem etru ni mogoče zaznati upora, se je Youngu zdela preveč nenavadna, tako da je prenehal raziskovati svetlobo. Podobno se je godilo tudi Aragoju. Čeprav je spočetka vneto podpiral Fresnela, „*sta moža izhajala iz različnih okolij, prinesla v sodelovanje zelo različne pojme o tem, kaj je svetloba in kako jo je treba raziskovati. [...] Njuno delo je v enotno fronto združilo ta različna prijemata, a povzročilo njun razhod leta 1821. Čeprav so se sadovi njune zveze pokazali za izredno trdne, je soglasje med njima vselej bilo le delno.*“ [4]

Za Fresnela je bil izid Aragojevega poskusa izziv, ki ga je želel pojasniti v valovni sliki. V objavljenem pismu Aragoju je vpeljal zamisel o gibanju etra v gibajočih se telesih. Hkrati se je prepričal, da se z njo v prvem redu količnika v/c svetloba z zvezde pri prehodu skozi prizmo ne odkloni drugače, neodvisno od relativne hitrosti prizme glede na zvezdo [5]. Eter z gostoto ρ_0 prežema prazen prostor in vso snov. V gibajočem se telesu del etra z gostoto ρ_0 še naprej miruje. Gostota etra pa se poveča na ρ in prirastek z gostoto $\rho - \rho_0$ se giblje s hitrostjo telesa v . Hitrost težišča etra v gibajoči se

snovi je $[\rho_0 \cdot 0 + (\rho - \rho_0)v]/(\rho_0 + \rho - \rho_0) = (1 - \rho_0/\rho)v = (1 - c_1^2/c^2)v$. Pri tem je c_1 hitrost svetlobe v mirujoči snovi in c hitrost v praznem prostoru. Po Fresnelu smo upoštevali izkušnjo, da je v mehaniki hitrost valovanja obratno sorazmerna s kvadratnim korenem iz gostote. Fresnel je sklepal, da svetloba potuje v gibajoči se snovi s hitrostjo $c_1 + (1 - c_1^2/c^2)v = c/n + (1 - 1/n^2)v = c/n + k_F v$. Nazadnje smo vpeljali lomni količnik snovi $n_1 = c/c_1$ in Fresnelov koeficient $k_F = 1 - 1/n^2$. Ne kaže zamolčati, da je Fresnelov privzetek težavi, da ni čutiti upora pri gibanju po trdnem etru, dodal še novo. Za vsako valovno dolžino mora obstajati poseben eter, ker je v prozorni snovi zaradi disperzije hitrost svetlobe odvisna od valovne dolžine.

Hyppolite Fizeau je z interferometrom, v katerem sta delna curka svetlobe potovala v smeri toka vode in v nasprotni smeri, leta 1851 podprl Fresnelov račun. Leta 1886 sta to z izpopolnjenim interferometrom in natančneje storila tudi Albert Abraham Michelson in Edward Williams Morley. Za vodo z lomnim količnikom $\frac{4}{3}$ račun za Fresnelov koeficient da 0,438, Fizeau je nameril 0,46, Michelson in Morley pa 0,434.

Fiziki so si vse 19. stoletje zaman prizadevali, da bi izmerili hitrost Zemlje v etru. Najznamenitejši poskus te vrste je naredil Michelson sam leta 1881 in skupaj z Morleyem leta 1887. Šele Albert Einstein je v posebni teoriji relativnosti leta 1905 pokazal, da je predstava o etru nepotrebna in elektromagnetno valovanje potuje po praznem prostoru s hitrostjo, ki ni odvisna od hitrosti izvira.

Če upoštevamo ta razvoj, Aragojev poskus „*ni uspel, osnovan je bil na zgrešenih teoretičnih izhodiščih o potovanju svetlobe, Fresnel ga je zgrešeno pojasnil, a to pojasnilo je pripeljalo do (pravega) pogleda, da ima svetloba valovne lastnosti. Zgrešeno pojasnilo pa je fiziko napeljalo na stoletno iskanje napačne sledi, ki se je končalo z rojstvom Einsteinove relativnosti.*“ [6] Pretirano je v Aragojevem poskusu, narejenem v okviru delčne slike, videti zasnovo teorije relativnosti. Ni pa mogoče zanikati njegove zveze s številnimi poznejšimi neuspešnimi poskusi, da bi izmerili hitrost Zemlje v etru. Vsekakor je Aragojev poskus neposredno pripeljal do Fresnelove enačbe za hitrost svetlobe v gibajoči se prozorni snovi. Fresnel je s svojo zamislijo o etru obdelal še nekaj drugih pojavov in izpeljal enačbe, ki delno veljajo še danes [3]. Vseeno je to zamisel popolnoma izpodrinila teorija elektromagnetnega polja. Ob tem se vsili misel, da se utegne podobno goditi tudi teorijam, ki jim danes zaupamo.



Leta 1786 rojeni Dominique François Jean Arago je po študiju na École polytechnique leta 1806 z Biotom v Španiji začel meriti dolžino poldnevnikarja.

Po dogodivščinah, vrednih pustolovskega romana, se je čez tri leta vrnil v Pariz. Ukvarjal se je z elektriko, magnetizmom in svetlobo. Z Biotom je raziskal lom svetlobe v ozračju. Pojasnil je tudi migotanje zvezd. Tedaj je še stavil na delčno teorijo svetlobe.

Leta 1820 je izvedel za Ørstedove poskuse in akademiji takoj poročal o njih. Med prvimi je naredil elektromagnet. Z Alexandrom Humboldtom je meril zemeljsko magnetno polje na različnih krajih. Opazil je, da se je magnetnica začela vrteti okoli navpične osi, če je pod njo ali nad njo vrtel nemagnetno kovinsko ploščo. Magnetnica se je tudi hitreje zaustavila, če jo je spravil v nihanje v kovinski škatli ali blizu kovinske plošče. Pojave je desetletje pozneje pojasnil Michael Faraday, ko je odkril indukcijo. Arago je opazoval mrke Jupitrovih lun in na način Oleja Rømerja izmeril hitrost svetlobe. Svojega študenta Urbaina le Verriera, ta ga je pozneje nasledil kot vodja pariškega astronomskega observatorija, je spodbudil, da je raziskal motnje v gibanju planeta Urana, kar je pripeljalo do odkritja Neptuna.

Arago je načrtoval poskus, ki bi jasno odločil, ali je hitrost svetlobe v zraku večja ali manjša kot v vodi, ali velja valovna ali delčna slika. Poskusa sam ni mogel več narediti, zanj pa je pridobil mlajša sodelavca Fizeauja in Leona Foucaulta, ki sta se pozneje razšla. Fizeau je prvi izmeril hitrost svetlobe v zraku med pariškima gričema. Foucault pa je v laboratoriju prvi z merjenjem ugotovil, da je hitrost svetlobe v zraku večja kakor v vodi. Vendar je valovna slika prevladala že pred poskusom. Arago je bil član akademije znanosti. Večkrat so ga izvolili za poslanca. Leta 1848 je postal minister za vojsko in mornarico. Dvakrat je vodil pariški občinski svet. Umril je leta 1853.

LITERATURA

- [1] François Arago, *Memoire sur la vitesse de la lumière*, lu à la première Classe de l'Institut le 10 décembre 1810, Comptes rendus de l'Academie des sciences **36** (1853), str. 38–49.
- [2] Rafael Ferraro in Daniel M. Sforza, *Arago (1810): the first experimental result against the ether*, Eur. J. Phys. **26** (2005), str. 195–204.
- [3] J. Strnad, *Eter in hitrost svetlobe*, Fizika v šoli **11** (2005), str. 1–4; *O Fresnelovem etru*, Obzornik mat. fiz. **54** (2007), str. 125–132.
- [4] Theresa Levitt, *Editing out caloric: Fresnel, Arago and the meaning of light*, The British Journal for the History of Science **33** (2000), str. 49–56.
- [5] A. J. Fresnel, *Letter from Augustin Fresnel to François Arago concerning the influence of terrestrial movement on several optic phenomena*, prevedeno iz *Anales de chimie et de physique* **9** (1818) 57.
- [6] *What a drag: Arago's experiment (1810)*,
<http://skullsinthestars.com/2008/07/05/what-a-drag-aragos-experiment-1810/>.