

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 12 (1984/1985)

Številka 5

Strani 233-239

Janez Strnad:

HITREJE KOT SVETLOBA?

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/12/763-Strnad.pdf>

© 1985 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

HITREJE KOT SVETLOBA?

Začnimo z nekoliko pustolovsko zgodbo, ki pa bi se dandanes lahko v celoti zares primerila. Mislimo si vesoljca na Luni na eni izmed odprav Apollo. Na temni strani postavita v razdalji 10 m merilnika 1 in 2, ki sta občutljiva za kratkotrajne svetlobne bliske, in ju priključita na elektronsko napravo za merjenje časa. Po daljšem premeščanju merilnikov, preskušanju in dogovarjanju s središčem odprave na Zemlji začneta s poskusi. Pri prvem zaznata merilnika kratkotrajna in šibka bliska, in sicer merilnik 2 30 nanosekund (1 nanosekunda = 1 milijardinka sekunde = 10^{-9} s) pozneje kot merilnik 1. Poskus večkrat ponovita. Če zmanjšata razdaljo na polovico, na 5 m, zazna merilnik 2 blisk 15 nanosekund pozneje kot merilnik 1. Pri večji ali manjši razdalji je zakasnitev vselej sorazmerna z razdaljo obeh merilnikov. Poskusa ni mogoče pojasniti drugače, kot da se premika od merilnika 1 do merilnika 2 svetlobni curek, ki bi ga videli na površju Lune kot pego, če bi imeli dovolj občutljive oči. To ni nič nenavadnega. Nenavadna pa je hitrost premikanja pege, ki jo dobimo po stari navadi: delimo pot s s časom t :

$$u = s/t = 10 \text{ m}/30 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1} = 3,3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 330 \text{ 000 km/s}$$

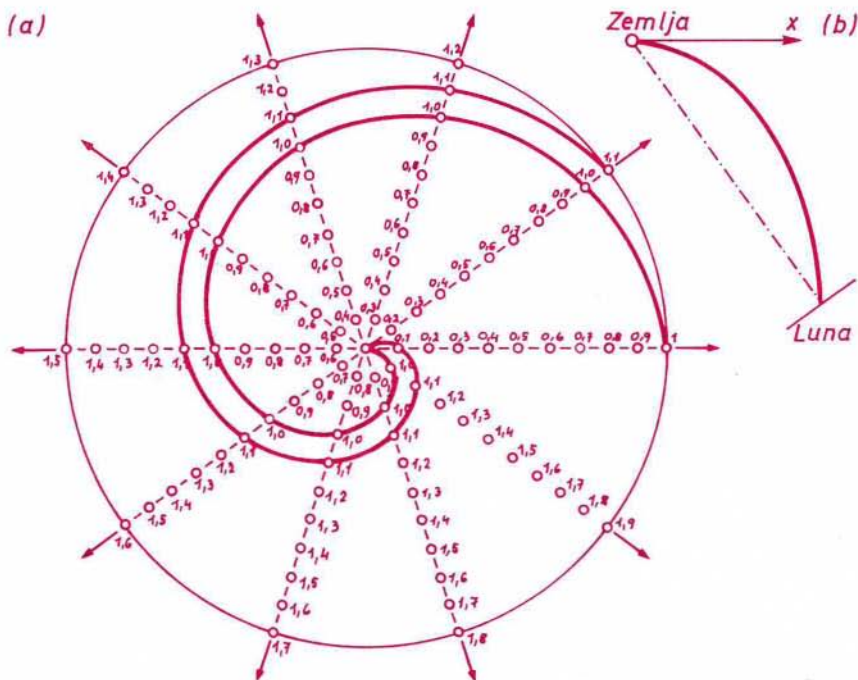
To je več od hitrosti svetlobe v vakuumu[☆] $c = 300 \text{ 000 km/s}$ in o tem je vredno podrobneje razmisliti.

Kaj se med poskusom dogaja na Zemlji? V nekem observatoriju^{☆☆} svetijo ponoči na Luno z laserjem, ki oddaja močan vzporedni curek svetlobe in ki

☆ Svetlobna hitrost v praznem prostoru meri $c = 300 \text{ 000 km/s}$, natančneje $c = 299 \text{ 792,458 km/s}$. Od srede oktobra 1983 je navedena vrednost določena z dogovorom in ne več z merjenjem. Generalna konferenca za uteži in mere je namreč na zasedanju v Parizu sprejela novo definicijo metra: "1 meter je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v časovnem razmiku $1/299 \text{ 792 458}$ sekunde."

☆☆ Zares so v McDonaldovem observatoriju v ZDA skozi astronomski daljogled svetili s kratkotrajnimi laserskimi bliski na Luno in lovili odbito svetlobo. Svetloba se je odbila na nekakšnem velikem mačjem očesu, ki sta ga na Luno prinesla vesoljca in ki je poskrbelo, da je bil odbiti curek natanko vzporeden vpadnemu. Po zakasnitvi, s katero se je svetloba vrnila na Zemljo, so natančno določili oddaljenost Lune. Za pot do okoli 384 000 km oddaljene Lune in nazaj je potrebovala svetloba dobri 2 sekundi. Vrteli pa laserja niso. To in merilnika z elektronsko uro smo si izmislili.

Da se bomo lažje pogovarjali, mislimo na curek elektronov namesto na curek svetlobe. Namesto Lune si mislimo valjast zaslon okoli izvira tako, da je izvir na njegovi geometrijski osi. Vzemimo, da je hitrost elektronov $v = 1 \text{ m/s}$, da se zavrti izvir enkrat v času $t_0 = 1 \text{ s}$ in da ima valj radij $r = 1 \text{ m}$. Radi bi dobili pregled nad gibanjem elektronov. V začetnem trenutku, ko začnemo meriti čas, naj bo izvir usmerjen po osi x . Elektron, ki ga tedaj zapusti, potuje enakomerno po tej osi in doseže valj po 1 sekundi. Desetino sekunde pozneje je izvir usmerjen pod kotom $(2\pi/t_0) \cdot t = 2\pi/10$, torej desetino polnega kota, proti osi x . Elektron, ki ga zapusti v trenutku 0,1 s, se enakomerno giblje proti valju in ga doseže v trenutku 1,1 s. V trenutku 0,2 s je izvir usmerjen pod kotom



234

$2.2\pi/10$ proti osi x in elektron, ki ga zapusti v trenutku $0,2$ s, zadene valj v trenutku $1,2$ s. Zdaj že vemo, kako gre račun dalje. Naposled kaže v trenutku 1 s izvir zopet v smeri osi x in se igra ponovi. Tiri vseh elektronov potekajo v radialni smeri in v tej smeri se vsak izmed njih giblje s hitrostjo v .

Namesto da bi zasledovali gibanje posameznega elektrona, se lahko vprašamo po trenutni sliki curka. Če bi bil v valju ostanek plina, katerega molekule bi ob trkih z elektroni sevale, bi jo lahko fotografirali. Na risbi (slika 1) jo dobimo, ko povežemo lege različnih elektronov ob enakem času, denimo v trenutku 1 s. Krivulja je znana kot *Arhimedova spirala*. Trenutna slika v trenutku $1,1$ s je enaka Arhimedova spirala, le da je za desetino polnega kota zasukana proti prvi. Mislimo si pač, da se curek vrti skupaj z izvirom, kot da bi bil z njim togo povezan. Podobnih slik smo vajeni pri daljnovzhodnih ognjenih obročih in vodnih kolesih za zalivanje vrta, le da pri njih curki isker ali vode ne izhajajo od osi.

S kolikšno hitrostjo se premika pega, to je presečišče curka in ovire? Odgovor je preprost, saj se curek zasučje za enak kot kot izvir, pega pa je v razdalji r od izvira. Enačbo $s = r\varphi$, ki povezuje lok s s središčnim kotom φ in radijem r , delimo s časom:

$$u = s/t = r(2\pi/t_0)$$

Pri tem smo za kot vstavili $\varphi = (2\pi/t_0)t$. Za naš primer je hitrost pege na valju $u = 1 \text{ m} \cdot (2\pi/1 \text{ s}) = 6,3 \text{ m/s}$ precej večja od hitrosti elektrona v . Namesto valja si lahko mislimo oviro kot del tangentne ravnine. Dobljeni rezultat velja tudi za ta primer.

V rezultatu ne nastopa hitrost elektronov. Zato ga brez skrbi uporabimo tudi za svetlobni curek. Z njim izračunamo, v kolikšnem času bi se moral laser enkrat zavrteti, da bi se pega na Luni premikala s hitrostjo $u = 3,3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$:

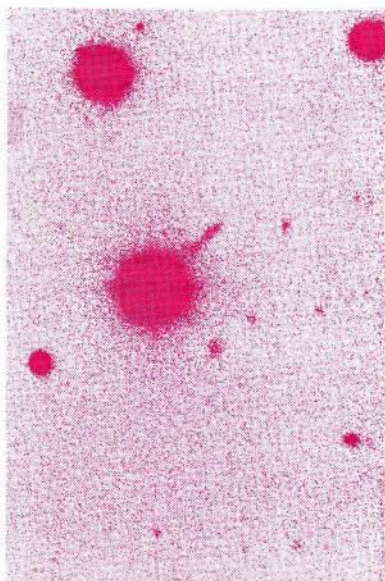
$$t_0 = 2\pi r/u = 2\pi \cdot 3,84 \cdot 10^8 \text{ m} / 3,3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} = 7,2 \text{ s}$$

Laser bi bilo treba vrteti razmeroma počasi.

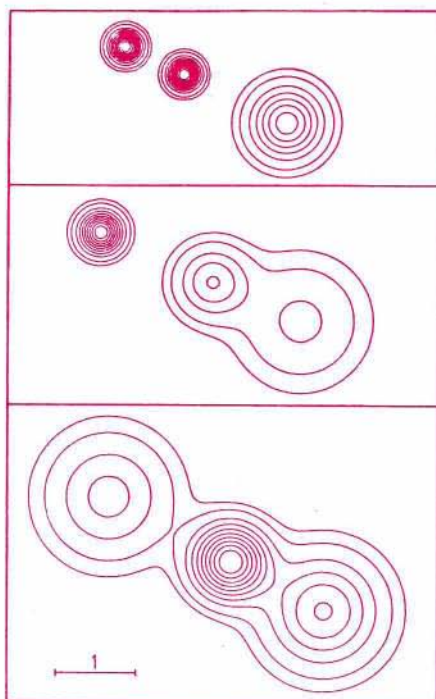
Zdaj si pogledjmo nekoliko podrobneje dogajanje ob oviri, na Luni ali na valju. Točko 2 ob merilniku 2 zadenejo drugi deli elektromagnetnega valovanja ali drugi elektroni kot točko 1 ob merilniku 1. Ne valovanje, se pravi energija, ne delci torej ne potujejo s hitrostjo u . S to hitrostjo pa tudi ne moremo prenašati sporočil od točke 1 do točke 2. Če bi hotel opazovalec ob točki 1 opazovalcu ob točki 2 poslati sporočilo, ki bi mu nekaj povedalo, bi moral imeti vsaj dve možnosti. Moral bi pritisniti na tipko telegrafa in jo popustiti, da bi pisalo pri drugem opazovalcu pisalo in ne bi pisalo, ali prižgati luč in jo ugasniti, da bi videl drugi opazovalec svetlobo in je ne bi videl. Pri curku, ki se zavrti vselej v enakem času, pa ni teh možnosti. Če oplazi curek točko 1, oplazi nekoliko pozneje neizogibno tudi točko 2 na svoji poti, kot da bi ves čas pri-

tiskali tipko telegrafa ali imeli ves čas prižgano luč. Če pa bi hoteli curek prekiniti, ko bi bila pega med točko 1 in točko 2, bi morali to storiti med izvirom in točkama 1 in 2. Ukaz za prekinitev bi potoval od točke 1 v nasprotni smeri curka in sprememba v curku bi potem potovala v smeri curka do točke 2 s hitrostjo svetlobe ali s hitrostjo elektronov. Tako bi sporočilo iz točke 1 do točke 2 zagotovo ne moglo prehiteti svetlobe.

Poskus s podobnim izidom lahko naredimo s curkom elektronov v cevi katodnega osciloskopa. Curek elektronov izhaja iz segrete katode in izstopa skozi odprtino v anodi. Če je anoda na primer na napetosti 100 V proti katodi, imajo elektroni hitrost 5900 km/s. Curek gre skozi prvi kondenzator z navpičnima ploščama in skozi drugi kondenzator z vodoravnima ploščama ter zadene fluoescenčni zaslon, na katerem vidimo svetlo pego. Če je na obeh konden-



Slika 2a



Slika 2b

Slika 2. Kvazar 3C 273 z značilno izboklino, ki kaže enega od obeh curkov snovi. Fotografijo so naredili s petmetrskim daljnogledom na Mt. Palomarju (a). Osrednji del in stranska curka kvazarja 3C 273, kakor so jih določili z radijskimi teleskopi na način, ki je opisan v besedilu. S slik je mogoče določiti navidezno hitrost odmikanja curkov, ki je večje od svetlobne hitrosti (b). Premik spektralnih črt proti rdečemu delu spektra kaže, da se kvazar oddaljuje s hitrostjo 0,16 c. Njegova oddaljenost meri skoraj 3 milijarde svetlobnih let.

zatorjih konstantna napetost, pega miruje. Pega pa se premika po zaslonu, če damo na kondenzatorju napetost, ki se spreminja s časom. S spremenljivo napetostjo dosežemo torej enak učinek kot z vrtenjem izvira. Hitrost pege lahko preseže svetlobno hitrost, če se napetost na kondenzatorjih dovolj hitro spreminja. Osciloskop mora imeti pač dovolj dober ojačevalnik, da sledi zelo hitrim spremembam napetosti na vhodu.

Nazadnje omenimo še zanimiv pojav, ki so ga zasledili astronomi pri opazovanju kvazarjev. Ti se kažejo pri opazovanju z daljnogledom kot navadne šibke zvezde (slika 2). Vendar se zelo hitro oddaljujejo, so zelo oddaljeni in sevajo močnejše kot sto milijard Sonc. Poleg tega oddajajo večinoma tudi izdatno radijsko valovanje. Kaže, da so nekateri kvazarji sestavljeni iz dveh in nekateri iz treh delov. Pri slednjih se zdi, da se od osrednjega telesa oddaljujejo kot stranski telesi curka sevajoče snovi na nasprotnih straneh. To so ugotovili po merjenjih z zelo kratkimi radijskimi valovi.

Pri enem od najnatančnejših merjenj so uporabili pet velikih radioteleskopov v zelo veliki medsebojni razdalji: Big Pine v Kaliforniji, Fort Davis v Teksasu, Green Bank v Zahodni Virginiji v ZDA, Algonquin Park v Ontariu v Kanadi in Effelsberg v Zahodni Nemčiji. Po dva in dva so povezali v par in opazovali hkrati z obema. Tako so pri valovni dolžini 2,8 cm dosegli ločljivost tisočinke kotne sekunde, kar je tisočkrat bolje kot pri opazovanju z najzmogljivejšimi daljnogledi. Pri kvazarju 3C 273 so lahko pojasnili opazovanja s privzetkom, da se stranski telesi navidez odmikata drugo od drugega z nekajkratno svetlobno hitrostjo.

Poskusimo preprosto pojasniti to veliko navidezno hitrost. Vzemimo, da odda kvazar v razdalji več milijard svetlobnih let v trenutku $t = 0$ v točki 1 curek elektronov s hitrostjo v pod kotom φ proti zveznici z Zemljo (slika 3). Radijski valovi, ki nastanejo tedaj v okolici točke 1, dospejo do Zemlje po času $t_1 = r/c$, če je r oddaljenost kvazarja. Čas t_1 meri več milijard let; pojav, ki ga opazujemo danes, se je zgodil na kvazarju pred tolikšnim časom.

Po času $t = l/v$ dosežejo elektroni točko 2 v oddaljenosti l od točke 1. Točka 2 je v razdalji $r - l \cos \varphi$ od Zemlje in valove iz točke 2 opazimo po času $(r - l \cos \varphi)/c$ od trenutka, ko so elektroni zadeli točko 2 in tam sprožili sevanje valov. Do nas pridejo valovi iz točke 2 po času $t_2 = t + (r - l \cos \varphi)/c$. Navidezna hitrost je določena kot kvocient navidezne razdalje in časa potovanja. Opazovalec na Zemlji nameri tedaj prečno na smer opazovanja navidezno hitrost

$$u = l \sin \varphi / (t_2 - t_1) = l \sin \varphi / (l/v - l \cos \varphi / c) = v \sin \varphi / (1 - v \cos \varphi / c)$$

Za drugi curek elektronov, ki potuje na nasprotno stran, velja podoben račun. Upoštevati moramo le, da se v njem elektroni oddaljujejo od nas, če so se v prvem curku približevali. Tako dobimo za navidezno hitrost $u' = v \sin \varphi / (1 + v \cos \varphi / c)$. Navidezna hitrost, s katero se prvi curek oddaljuje

od drugega, je določena z razliko

$$u - (-u') = u + u' = 2v \sin\varphi / (1 - v^2 \cos^2 \varphi / c^2)$$

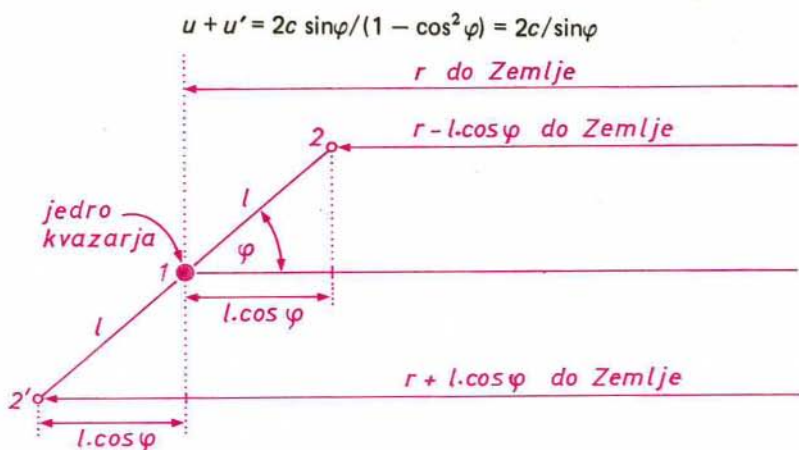
Z minusom pred u' smo upoštevali, da ima ta hitrost nasprotno smer kot hitrost u .

Denimo, da se elektroni gibljejo s hitrostjo $v = 0,9c$. (Tolikšno hitrost imajo elektroni s kinetično energijo 700 000 elektronvoltov.) Če je kot $\varphi = 30^\circ$, dobimo $u = 0,9c \cdot \sin 30^\circ / (1 - 0,9 \cos 30^\circ) = 2,04c$ in $u' = 0,9c \cdot \sin 30^\circ / (1 + 0,9 \cos 30^\circ) = 0,25c$ ter $u + u' = 2,29c$.

Omenimo še drugačno razlago istega pojava, po kateri ne gre za potovanje elektronov, ampak svetlobe. Zato govorijo o "svetlobnem odmevu". Osrednji del kvazarja odda orjaški blisk in svetloba potuje po redki snovi stranskega dela na eni in na drugi strani. Ta snov sama ne seva in ni treba da se hitro giblje. Na poti po njej pa svetloba sproži sevanje radijskih valov na vse strani, tudi proti nam. Nekaterih delov snovi svetloba še ni zajela, druge pa je že, tako da z radijskimi valovi opazujemo premikanje meje med obema območjema. Navidezno hitrost te meje dobimo kar iz zapisanih enačb za elektrone, ko v nadomestimo s c :

$$u = c \sin\varphi / (1 - \cos\varphi) \quad u' = c \sin\varphi / (1 + \cos\varphi)$$

in



Slika 3. Curek elektronov potuje iz točke 1 v točko 2. Na Zemlji se zdi, da je navidezna hitrost u večja od svetlobne hitrosti. Curek elektronov na nasprotni strani potuje iz točke 1 v točko 2'. Navidezna hitrost je u' . Curka se odmikata drug od drugega z navidezno hitrostjo $u + u'$.

Slika 4 . Še en pojav, pri katerem lahko naletimo na hitrost, večjo od svetlobe: Ravni valovi potujejo po morju s hitrostjo c_1 , pri čemer tvorijo valovne črte z ravno obalo kot Θ . Pršec S , ki nastane tam, kjer zadene obalo valovni vrh, potuje po obali s hitrostjo $c_1/\sin\Theta$. Ta hitrost je lahko večja od svetlobne hitrosti. Pri pravokotnem vpadu, ko je kot Θ enak nič, postane celo neskončna: pršec se ob vsakem valovnem vrhu pojavi po vsej obali istočasno. Pribijmo, da s to hitrostjo ne potujejo ne deli snovi ne energije ne sporočila. Risba je vzeta iz knjige L.C.Epsteina *Relativity Visualized* (Ponazorjena relativnost).



Pri kotu $\varphi = 30^\circ$ imamo $u = 3,73c$, $u' = 0,27c$ in $u + u' = 4c$.

Tako smo nakazali samo dve preprosti razlagi za veliko navidezno hitrost v kvazarjih. S tem pojava nikakor nismo do kraja pojasnili. Najprej je mogoče merjenje z radijskimi teleskopi razlagati tudi drugače. Poleg tega pa je treba pojave, ki se dogajajo v globini vesolja, opisati s precej bolj zapletenimi enačbami.

Vse dosedanje eksperimentalne izkušnje kažejo, da je svetlobna hitrost v vakuumu meja, ki je ne more preseči ne hitrost delcev ne hitrost potovanja energije v valovanju ne hitrost prenašanja sporočil. To spoznanje je vgrajeno v posebno teorijo relativnosti.

Večja hitrost ni prepovedana, če gre za geometrijsko ali navidezno hitrost, torej ne za hitrost delcev, energije ali sporočil. Če boste brali o vesoljih, ki potujejo hitreje kot svetloba, sodi zgodba zagotovo v znanstveno fantastiko. Enako velja za zgodbo, v kateri energija ali sporočila potujejo hitreje od svetlobe. Vendar naši zgledi kažejo, da ni vse kar se zdi hitreje kot svetloba, le-znanstvena fantastika.

Janez Strnad