PRESEK
List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652
Letnik **9** (1981/1982)
Številka 1
Strani 34–39

Peter Gosar:

ODBOJ SVETLOBE NA VODNI GLADINI

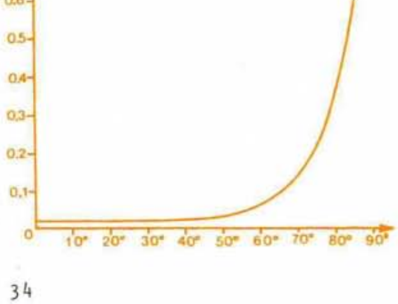
Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: http://www.presek.si/9/9-1-Gosar.pdf

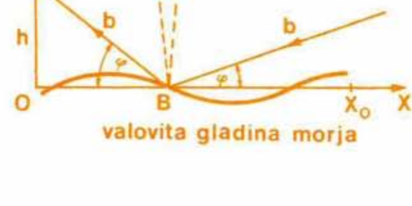
FIZIKA

ODBOJ SVETLOBE NA VODNI GLADINI

Vodna gladina deluje kot zrcalo. V stoječi vodi se lahko prav dobro vidimo. Za to je potrebno le, da smo dovolj osvetljeni, voda sama pa mora biti v senci. To nam najbolje dokaže pogled v globok vodnjak. Razmerje med svetlobnim tokom odbite in vpadle svetlobe na vodno površino, ki mu pravimo tudi odbojnost, je v splošnem majhno, pri navpičnem vpadu žarkov le okoli 0.02. Zato zaznamo odbito svetlobo le, če je malo stranske svetlobe, ki izvira od osvetljenih predmetov, v okolici ali v vodi sami. Odbojnost R narašča s kotom ϑ med smerjo žarka in normalno na gladino. Glej sl. 1! Znaten odboj dobimo le pri zelo velikih kotih, $\vartheta > 70°$. Dosti sončne svetlobe se na primer odbije na morski gladini ob sončnem vzhodu ali zahodu.



Slika 1



Slika 2

Tedaj vpadajo sončni žarki na morsko gladino zelo poševno in je zato odboj svetlobe močan. Sončni zahod na morju predstavlja izredno lep in slikovit svetlobni pojav. To, kar pri tem vidimo, pa ne spominja dosti na zrcalno sliko sonca v zrcalu, ki naj bi ga predstavljala morska gladina. Namesto zrcalne slike vidimo na morju svetlikajočo se svetlobno progo v smeri zahajajočega sonca. Nekaj podobnega opazujemo na morju in jezerih tudi ponoči ob gledanju odseva oddaljenih svetil. Morska površina ni nikoli gladka kot zrcalo. Njena valovitost vpliva na to, kako se na njej svetloba odbija. Pri vodnjaku se najlaže prepričamo, da valovanje na vodi, ki ga povzročimo s spustom kamenčka, zaniha in popači zrcalno sliko. V tem zapisu bomo poskušali natančneje povedati, kako se svetlobni žarki odbijajo na valoviti gladini vode.

Opazovalec na morski obali gleda zelo oddaljeno svetilo, ki je le malo nad obzorjem. Njegovo oko zazna direktne in na morski gladini odbite žarke. To je ponazorjeno na sl. 2, kjer je tudi predstavljen koordinatni sistem, s pomočjo katerega bomo naredili nekaj preprostih računov. Opazovalčevo oko je na mestu A v višini h nad morjem. Direktni žarek je označen s črko a, žarek, ki se odbije na morski gladini na mestu B, pa s črko b. Izhodišče koordinatnega sistema 0 predstavlja podnožje opazovalca na nivoju morja. Koordinatna os 0X leži na gladini v smeri proti svetilu. Os 0Z je navpična. Os 0Y, ki ni narisana na sl. 2, je pravokotna na ostali dve osi. Koordinate točk na morski gladini so torej (x, y, 0). Kotna višina svetila, ki ga bomo obravnavali kot neskončno oddaljeno, je označena s črko φ.

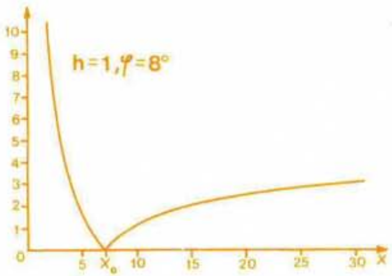
Poglejmo najprej, kdaj se lahko žarek b odbije v točki B s koordinatami (x, 0, 0) tako, da odbiti žarek pride v opazovalčevo oko pri A. Pogoj za to je primeren nagib α vodne gladine v tej točki glede na vodoravno lego. Ker sta pri zrcalnem odboju vpadni in odbojni kot enaka, sledi iz slike zahteva

$$\varphi' - \alpha = \varphi + \alpha$$

ali

$$\alpha = \frac{1}{2}\left\|\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{h}{x}\right) - \varphi\right]\right\|$$

Odvisnost absolutne vrednosti kota α je pokazana na sl. 3 za $h = 1$ in $\varphi = 8^o$. Posebnost predstavlja točka $x_o = h\mathrm{tg}^{-1}\varphi$, kjer je $\alpha = 0$ in ki ustreza mestu zrcalnega odboja pri popolnoma vodoravni vodni gladini. V področju $x < x_o$ kot $|\alpha|$ hitro raste z zmanjševanjem oddaljenosti x. Nasprotno pa naraščanje $|\alpha|$ z rastočim x pri $x > x_o$ ni tako hitro in v limiti $x \to \infty$ kot $|\alpha|$ doseže razmeroma majhno vrednost $\varphi/2$. Različno obnasenje $|\alpha|$ pri $x < x_o$ in $x > x_o$ je zelo pomembno za razumevanje svetlobne proge na morju ob sončnem zahodu. Svetlobna proga nikoli ne sega do obale oziroma opazovalca. Začne se šele v neki razdalji. Pogled na sl. 3 nam takoj pove zakaj. Nagib, ki ga ima lahko del vodne gladine na vodoravno ravnino, je odvisen od valovitosti ali razburkanosti morja. Pri dokaj mirnem morju, le tedaj je sončni zahod zares lep, so veliki nagibi malo verjetni. Zato ne pride do odboja pri majhnih razdaljah. Slika nam tudi pove, da pri velikih x te omejitve pri zahajajočem soncu ne bo, ker je največji potreben nagib le $\varphi/2$.



Slika 3

Čim bliže horizontu je svetilo, tem večja je razdalja x_o. Pri $h = 2\mathrm{m}$ in $\varphi = 8^o$ je x_o približno 14m.

Do tu smo se zanimali le za odboj svetlobe na morski gladini vzdolž črte OX. Žarki svetila pa se lahko odbijejo tudi na delih morske gladine levo in desno od te črte tako, da pride odbita svetloba v opazovalčevo oko. Le nagib ustreznega dela morske površine mora biti ravno pravilen. Iz študija pogojev, ki morajo biti izpolnjeni pri takem odboju, bomo razumeli, kaj določa širino svetle proge na morju. Zanima nas predvsem nagib

α, ki ga mora imeti normala na vodno površino na mestu $(x, y, 0)$ glede na navpičnico. Kako izračunamo α bomo le nakazali. Z nekaj spretnosti in znanja trigonometrije ali vektorskega računa bo bralec sam izpeljal odvisnost kota α od koordinat x in y. Najprej si izberemo dva enotina vektorja e_s in e_0. Prvi kaže iz točke $(x, y, 0)$ proti svetilu, drugi pa proti opazovalcu. V komponentni obliki se vektorja e_s in e_0 zapišeta

$$e_s = (\cos\varphi,\ 0,\ \sin\varphi)$$

$$e_0 = (h^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}(-x,\ -y,\ h)$$

Pri odboju na zrcalu ležita vpadni in odbiti žarek v ravnini, ki gre skozi normalno n na zrcalo in z njo tudi oklepata enak kot. Glej sl. 4! Sklepamo, da vektor $e_s + e_0$ kaže v smeri normale n na vodno gladino v točki $(x, y, 0)$. Komponente vektorja $e_s + e_0$ so

$$e_s + e_0 = \left[\cos\varphi - \frac{x}{(h^2 + x^2 + y^2)^{1/2}},\ \frac{y}{(h^2 + x^2 + y^2)^{1/2}},\ \sin\varphi + \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{1/2}},\right]$$

Njegova dolžina pa je po Pitagorovem izreku

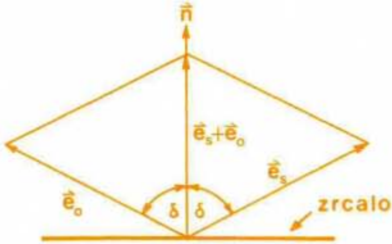
$$\left|e_s + e_0\right| = 2^{1/2}\left[1 + (h\sin\Phi - x\cos\Phi)(h^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}\ {}^{1/2}\right]$$

Sedaj z lahkoto izračunamo potreben nagib normale na vodno gladino na mestu $(x, y, 0)$. Kosinus nagiba α je podan z razmerjem komponente z vektorja $e_s + e_0$ in njegove dolžine. Torej

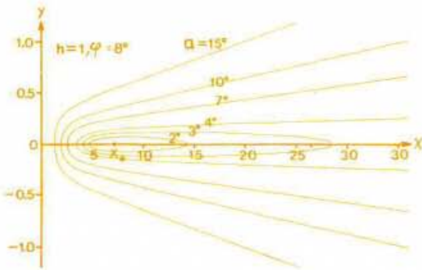
$$\cos\ = 2^{-1/2}\ \frac{\sin\varphi + h\ (h^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}}{\left[1 + (h\sin\varphi - x\cos\varphi)(h^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}\right]^{1/2}}$$

Ta izraz nam omogoča izračunati α za poljubno mesto na gladini. Na sl. 5 so narisane črte, ki povezujejo na vodni gladini točke z enakim nagibom α za primer $h = 1$ in $\varphi = 8°$.

Ne prezri, da je merilo v smeri y drugačno kot v smeri x! Pri kotih $\alpha < \varphi/2$ so črte enakega nagiba zaključene krivulje, pri $\alpha > \varphi/2$ pa ne. Težišče ploskve, ki jo omejuje zaključena krivulja, se z rastočim α odmika od točke $x = x_0$, ki ustreza odboju na vodoravni gladini, vedno bolj proti velikim x. Sl. 5 spominja na glavo kometa z jedrom in repom. Zanimivo je, da kot α zelo hitro narašča z $|y|$, če držimo x konstanten. Zato so majhni nagibi možni le v neposredni bližini osi OX. Ob mirnem morju prevladujejo le majhni α. Sedaj je razumljivo, zakaj je svetlobna proga, ki jo vidimo na morju ob sončnem zahodu, razmeroma ozka. Pri zelo velikih razdaljah $x >> x_0$ se krivulje enakega nagiba, če je $\alpha > \varphi/2$, močno razširijo. Vendar pri tem y ne raste hitreje kot x.



Slika 4



Slika 5

Migotanja odbite svetlobe ni treba posebej razlagati. Morje valovi in nagib α na izbranem mestu gladine se stalno spreminja. Odbita svetloba pride v oči opazovalca le v trenutkih, ko je izpolnjen pogoj, ki smo ga izpeljali za kot α.

Zanimivo bi bilo videti, kakšna je pogostost različnih nagibov. Dati kolikor toliko zanesljiv odgovor na to vprašanje ni lahko. Očitno je le, da so majhni nagibi bolj verjetni kot veliki. Pri čistem sinusnem valovanju je največji možen nagib $\alpha = \text{arctg}\,(2\pi H/\lambda)$, kjer je H amplituda valovanja in λ valovna dolžina. Velike nagibe dobimo torej le pri velikih amplitudah ali majhnih valovanih dolžinah valovanj.