

# Interferenca in uklon

Janez Strnad

V Mednarodnem letu svetlobe obudimo spomin na to, kako so v zavest fizikov vstopali novi pojavi s svetlobo. Po *Začetku uklona* je vredno obdelati uklon še v povezavi z interferenco. Uklonska mrežica je eno od pomembnih orodij optike. Opis nadaljuje *Malo zgodovino svetlobe*.

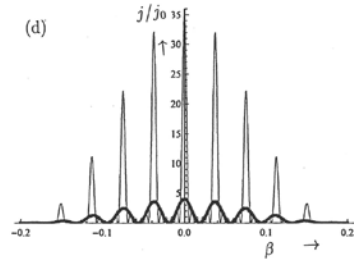
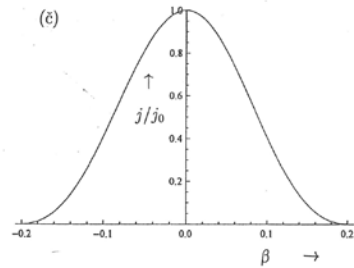
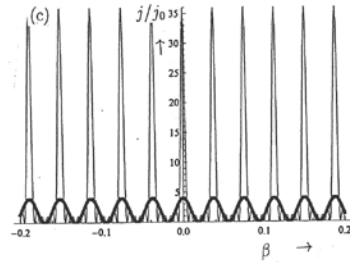
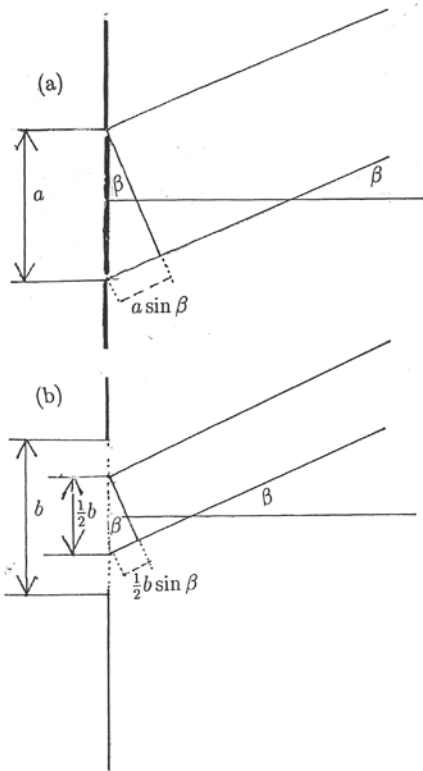
Newtonove kolobarje in barve tankih plasti je Thomas Young na začetku 19. stoletja pojasnil z interferenco valovanj, ki se odbijeta na prvi in drugi mejni ploskvi. Valovanji, ki interferirata, izvirata iz enega izvira. Poskusi, da bi opazovali interferenco valovanj iz dveh izvirov, so se izjalovili. To znamo pojasniti. V plinskem svetilu sevajo posamezni atomi in sevajo v povprečju samo stomilijonino sekunde. Pri tem nastanejo *valovne poteze*, ki so neodvisne druga od druge. Interferenca dveh valovnih potez sicer da določen izid, a kaj, ko je izid v naslednjem trenutku pri naslednjih potezah drugačen. Tako je tudi pri trdnem svetilu, katerega deli sevajo neodvisne valovne poteze. Svetloba je v teh primerih neurejena mešanica valovnih potez. Zato ne dobimo določenega izida, ko sestavimo svetlobi iz dveh navadnih svetil. Pravimo, da so valovanja iz navadnih svetil *nekoherentna*. Uspelo pa je opazovati interferenco svetlobe iz dveh laserjev.

Interferenco je mogoče opazovati pri *delnih valovanjih*, ki nastanejo z delitvijo enega valovanja. Delna valovanja so *koherentna*, saj je v njih razdeljena vsaka valovna poteza. Pri Newtonovih kolobarjih in barvi tankih plasti delni valovanji nastaneta tako, da se del vpadnega valovanja lomi, del pa odbije. Pravimo, da delni valovanji nastaneta z *delitvijo amplitude*. *Amplituda* je največja vrednost količine, s katero opišemo valovanje.

Svetlobo in elektromagnetno valovanje nasploh opišemo z jakostjo električnega polja. Gostota energijskega toka je sorazmerna s kvadratom jakosti.

Z interferenco je povezano *načelo superpozicije*. Opazujemo prvo delno valovanje, v katerem ima za valovanje značilna količina na določenem kraju v določenem trenutku prvo vrednost, in drugo delno valovanje, v katerem ima ta količina na tem kraju in v tem trenutku drugo vrednost. V sestavljenem valovanju ima za valovanje značilna količina na tem kraju in ob tem trenutku vrednost, ki je vsota prve in druge vrednosti. Načelo superpozicije ne velja v vseh primerih. Velja pri *linearnih pojavih*. Ni pa omejeno na svetlobo. Vpeljal ga je Daniel Bernoulli leta 1753, ko je obravnaval sisteme, ki so zmožni nihanja. Nekateri so spočetka dvomili, da velja. Za njegovo uveljavitev se je zavzel Joseph Fourier.

Delna valovanja dobimo še drugače, z *delitvijo valovnega čela* z zaslonom z odprtina. Zamislimo si, da na zaslon z odprtino pravokotno pada ravno valovanje. V takem valovanju valovna čela narišemo z deli premic. Na robovih se valovanje širi v geometrijsko senco, se ukloni. Delež energijskega toka v uklonjenem delu valovanja je majhen, dokler je odprtina zelo velika v primerjavi z valovno dolžino. Delež narašča, ko manjšamo odprtino, in prevlada, ko postane odprtina manjša od valovne dolžine. Tedaj iz odprtine izhaja eno samo elementarno valovanje. V takem *krožnem valovanju* valovna čela narišemo kot dele kroga. Krožno valovanje oddaja tudi *točkasti izvir*, ki je majhen v primerjavi z valovno dolžino.



Razlika poti med delnima valovanjema iz zelo ozkih rež v razmiku  $a$  je odvisna od kota  $\beta$ . Valovanji na zelo oddaljenem zaslonu se ojačita pri kotu, za katerega velja  $a \sin \beta = n\lambda, n = 0, 1, 2, \dots$ .

V našem primeru je med sosednjima progama kot  $2,15$  stopinje (a). Valovanji iz sredin obeh polovic reže s širino  $b$  se oslabita pri kotu  $\beta$ , za katerega velja  $b \sin \beta = n\lambda$ .

V našem primeru pri kotu  $11,5$  stopinje ni interferenčnih prog (b). Interferenčna slika pri Youngovem poskusu z dvema režama (odebeljeno) in pri šestih režah za razmerje med razmikom in valovno dolžino  $a/\lambda = 26,7$ . Tako je na primer pri mrežici s 75 režami na milimeter pri valovni dolžini zelene svetlobe

$\lambda = 500$  nanometrov =  $0,0005$  milimetra, kar da v našem primeru  $a = 0,0134$  milimetra (c). Interferenčna slika reže s širino  $b/\lambda = 5$ , kar da v našem primeru  $b = 0,0025$  milimetra (č), in interferenčna slika z mrežico rež z navedeno širino v navedenem razmiku (d). Na vodoravno os je nanesen kot  $\beta$  v radianih ( $57,3$  stopinje), na navpično os pa razmerje med gostoto svetlobnega toka  $j(\beta)$  in največjo gostoto pri eni reži  $j_0$ . Risbe le nakazujejo razmere, uklonske mrežice imajo veliko več rež.

Pri *Youngovem poskusu* na raven zaslon z vzporednima ozkima režama v razmiku  $a$  pravokotno pada ravno valovanje z valovno dolžino  $\lambda$ . Na zelo oddaljenem zaslonu opazujemo valovanje, ki nastane z interferenco. Iz rež izhajata enaki delni krožni valovanji, kot da sta tam točkasta izvira, ki nihata sočasno. V smeri naprej, pri kotu  $\beta = 0$ , je valovanje zagotovo ojačeno, saj delni valovanji iz obeh rež opravita enaki poti. Ko večamo kot na eno in drugo stran, se pri kotu  $\beta_{1/2}$  med valovanjema pojavi razlika poti  $\lambda/2$  in se valovanji oslabita. Pri kotu  $\beta_1$  je razlika poti  $\lambda$  in se valovanji ojačita in tako naprej. Razlike poti ni težko povezati s kotom, ker smemo pri zelo oddaljenem zaslonu privzeti, da sta delni valovanji vzporedni in je valovanje ojačeno, če velja:

$$a \sin \beta = n\lambda$$

in je

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

$$Vmes, \text{ za } n = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots,$$

pa je valovanje oslabiljeno. Dodajmo tretjo, četrto, ... vzporedno režo v enakem razmiku  $a$ . Koti, pri katerih je valovanje ojačeno, se ne spremenijo, saj lahko račun ponovimo za drugo in tretjo režo, tretjo in četrto režo in tako naprej. Spremeni se le potek gostote svetlobnega toka. Tako smo dobili *uklonsko mrežico*.

Dovolimo si še en kratek račun. Prejšnji račun velja za zelo ozke reže, ki prepuščajo le zelo šibko valovanje. Resnične reže imajo končno širino  $b$ . Režo si mislimo razdeljeno na dve polovici s širino  $b/2$ . Valovanje v vsaki od njiju za silo opišemo s sočasno nihajočima točkastima izvirova v točkah sredi polovic v razmiku  $b/2$ . Ti valovanji se oslabita, ko velja

$$\frac{b}{2} \sin \beta = n'\lambda/2.$$

Pri kotih  $\beta$ , za katere velja

$$b \sin \beta = n'\lambda,$$

je valovanje zaradi končne širine rež oslabiljeno. Pri uklonski mrežici s končno širino rež upoštevamo oboje, periodično razporeditev rež in njihovo širino.

Kot, pri katerem se za  $n = 1$ , v *spekttru prvega reda*, pojavi ojačeno valovanje, je odvisen od valovne dolžine:

$$a \sin \beta = \lambda.$$

Z uklonsko mrežico lahko izmerimo valovno dolžino! To je spoznal Joseph Fraunhofer. Spektre je opazoval s *spektroskopom*. Osvetljeno režo je postavil v goriščno ravnino zbiralne leče, da je nastal vzporeden curek svetlobe. Vanj je postavil uklonsko mrežico in opazoval *interferenčno sliko* z daljnogledom. Najprej je namesto mrežice uporabil prizmo, ki je razklonila svetlobo. Pri tem je moral spektroskop na začetku umeriti. Pri mrežici pa je valovno dolžino lahko naravnost izračunal, če je poznal razmik med sosednjima režama  $a$ . V letih 1814 in 1815 je Fraunhofer v Sončevem spektru opazoval množico temnih črt. *Spektroskopija*, to je merjenje valovne dolžine s spektrometri, se je razmahnila, ko so začeli uporabljati uklonske mrežice.

Fraunhofer se je prepričal, da temne črte v Sončevem spektru obdržijo lego druga glede na drugo. Opazil je, da se v Sončevem spektru pojavi temna črta pri valovni dolžini, pri kateri se v spektru sveče pojavi svetla rumena črta. Ugotovili so, da seva rumeno črto natrij. Temna črta nastane zaradi tega, ker atomi v hladnejši Sončevi atmosferi absorbirajo svetlobo s Sončevega površja s pravo valovno dolžino in jo sevajo na vse strani. V smeri proti Zemlji je zato manj sevanja in v spektru opazimo temno *absorpcijsko črto*. Enako kot valovne dolžine absorpcijskih



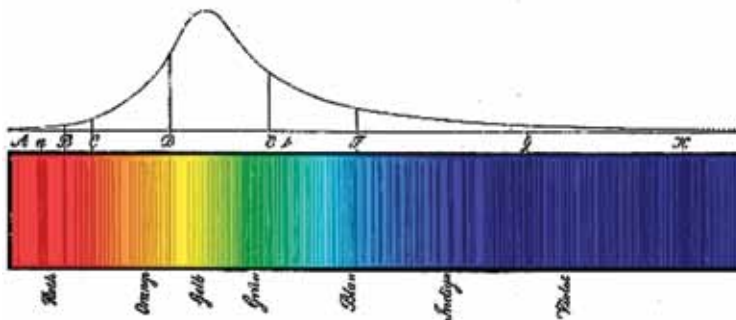
*Joseph Fraunhofer je bil rojen leta 1787 v Straubingu na Bavarskem v družini revnega steklarja. Mlad je moral v uk k izdelovalcu zrcal. Po rešitvi izpod ruševin stavbe, ki se je podrla, je na knezovo priporočilo dobil delo v optični tovarni. Tovarna, v kateri je s časom napredoval v družabnika, je izdelovala najboljše optično steklo. Iz nje izvira vsaj del ugleda današnje nemške optične industrije. Fraunhofer je izumil veliko pomembnih naprav. Za zasluge so mu podelili plemiški naslov. Svojih dosežkov ni objavil, ker je menil, da gre za poslovne skrivnosti. Umril je leta 1826 star 39 let.*

črt so za element značilne valovne dolžine *emisijskih črt*, ki jih sevajo atomi. Po valovni dolžini obojih črt v spektru je mogoče ugotoviti, atomi katerih elementov sevajo. V letih 1821 in 1822 je Fraunhofer premeril

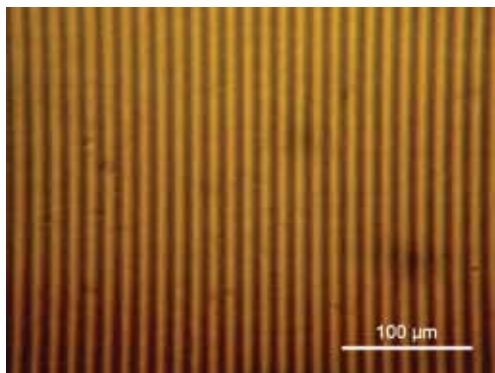
valovne dolžine številnih spektralnih črt v Sončevi svetlobi. Raziskal je spektre planetov in zvezd, sveče in razredčenega plina, po katerem je pognal električni tok.



Kemik Robert Wilhelm Bunsen in fizik Gustav Robert Kirchhoff sta razvila kemijsko *spektralno analizo*. Bunsen je raztopine soli žaril v brezbarvnem plamenu gorilnika, ki ga je izumil. Po



*Pri Fraunhoferjevem spektroskopu je na levi cev z rezo, ki jo osvetlijo, in lečo, ki naredi vzporeden curek svetlobe, na desni pa daljnogled. Med njima je prizma ali uklonska mrežica (zgoraj). Fraunhofer je s spektroskopom v Sončevem spektru opazil množico absorpcijskih črt in izmeril njihovo valovno dolžino (spodaj).*



*Mikroskopska slika uklonske mrežice s 75 režami na milimeter. Prve mrežice so v drugi polovici 17. stoletja izdelali tako, da so črte vrezali v zglajeno kovinsko ploščico. Ploščico so osvetlili z belo svetlobo in opazovali spekter v odbiti svetlobi. Fraunhofer je najprej napel tanke žičke med vzporedna vijaka, po deset na milimeter. Nato je stekleno ploščico prevlekel s tanko plastjo zlata in vanjo vrezal črte. Naposled je črte vrezal neposredno v stekleno ploščico. Kjer je konica razila steklo, je to postalo motno in je slabše prepustilo svetlobo. Razvil je napravo, ki je vrezala po sto in več vzporednih rež na milimeter. Cenejši so odlitki mrežic. Na mrežico nalijejo raztopino, ki naredi tanko plast, ko topilo izhlapi. Plast odlepijo in jo zaščitijo med zglajenima steklenima ploščicama.*

barvi izsevane svetlobe je poskušal ugotoviti kemijsko sestavo soli. Na Kirchhoffov predlog je uporabil spektroskop. Moža sta se prepričala, da so absorpcijske in emisijske črte značilne za kemijske elemente. Leta 1859 sta poročala o svojem dosežku in leta 1860 odkrila elementa cezij (modrikasti) in rubidij (rdeči). Pozneje so drugi s spektralno analizo odkrili še nekaj novih elementov. Pri kvalitativni kemijski analizi po valovni dolžini spektralnih črt ugotavljajo, kateri elementi so zastopani v vzorcu. Pri kvantitativni analizi po relativni jakosti črt sklepajo na deleže elementov. Za analizo potrebujejo zelo malo snovi, v skrajnem primeru manj kot milijonino grama. Spektralne analize ne uporabljajo samo kemiki in fiziki, ampak tudi zdravniki, detektivi in drugi. Posebno pomembna je v astronomiji. Z njo so ugotovi-

lili, da sestavljajo vesoljska telesa enaki elementi kot Zemlja. Poleg tega je omogočila, da so podrobneje spoznali sestavo vesolja. Pravijo, da je astrofizika postala znanost z uvedbo spektralne analize.

Uklon je teoretično pojasnil Augustin Fresnel leta 1818 s Huygensovim načelom tako, da je upošteval vpliv robov. Kjer so ovire, iz valovnih čel ne izhajajo elementarna valovanja. To ga je pripeljalo do splošne enačbe. V tej zvezi pogosto govorijo o *Huygens-Fresnelovem načelu*. Pri *Fresnelovem načinu* obravnavamo interferenčno sliko na bližnjem zaslonu, za katerega ne moremo privzeti, da je zelo oddaljen. Zato ne moremo vzeti, da so delna valovanja vzporedna. Pri *Fraunhoferjevem načinu* obravnavamo interferenčno sliko na zelo oddaljenem zaslonu in privzamemo, da so delna valovanja vzporedna.

Interferenco smo povezali z delitvijo amplitude in uklon z delitvijo valovnega čela. To je prikladno pri uvajanju obeh pojavov. Večina fizikov pa interferenco veže na majhno število delnih valovanj, denimo dve, uklon pa na veliko število delnih valovanj. Interferenco in uklon ima za sorodna pojava. Po Richardu P. Feynmanu: »Nikomur še nikoli ni uspelo definirati razločka med interferenco in uklonom. Gre za vprašanje rabe in med njima ni posebne, pomembne fizikalne razlike.« Tisti, ki mislijo drugače, menijo, da se na primer pri Newtonovih kolobarjih ni mogoče sklicevati na uklon: »Feynmanovo stališče odraža težave pri razločevanju delitve amplitude in delitve valovnega čela.« Zadrega se pokaže tudi pri imenih: govorimo o uklonski mrežici, a o interferenčni sliki.