

TALASI - II deo, jez. smer

Elektromagnetni talasi. Spektar

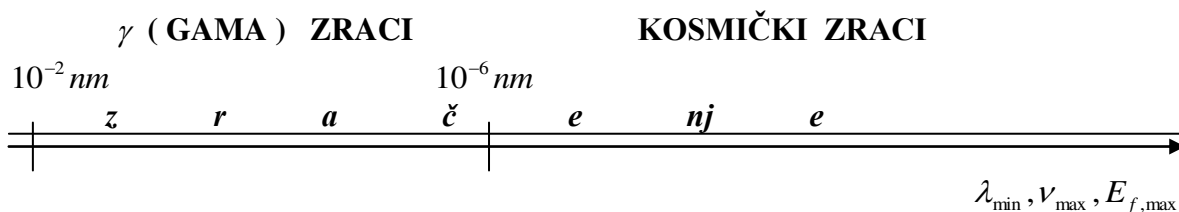
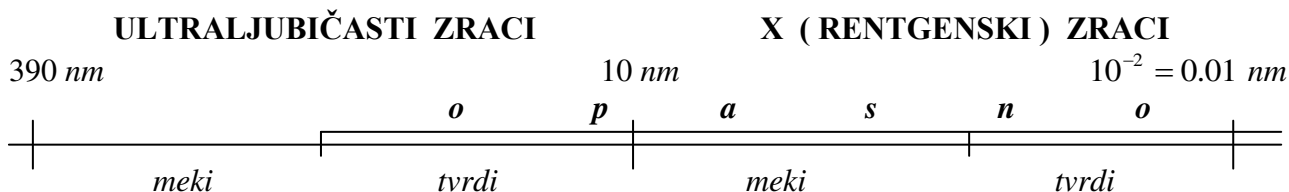
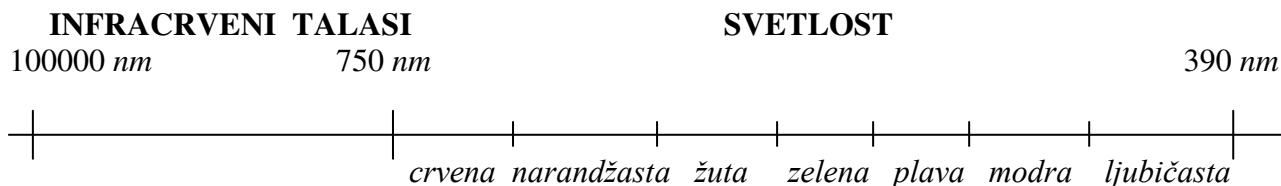
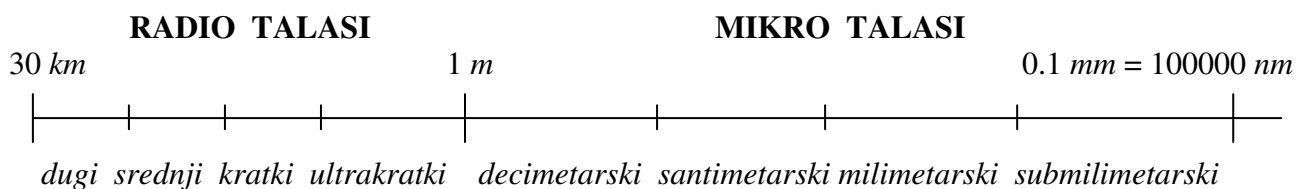
Elektromagnetni talas je energija elektromagnetnog polja koja se prostire brzinom svetlosti $c = 299792.5 \frac{km}{s} \approx 300000 \frac{km}{s} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ kroz vakuum. Brzina elektromagnetnih talasa u materijalnim sredinama je manja. Ako je brzina elektromagnetnog talasa u nekoj sredini manja tada kažemo da je ta sredina optički gušća i obrnuto

Zanimljivo je da se elektromagnetni talas u nekim pojavama ponaša kao običan talas, a u drugim pojavama kao mlaz čestica. Ovo ćemo više razmatrati u IV razredu.

Ako se ponaša kao mlaz čestica može se reći da se zrak elektromagnetnog talasa sastoji od zrnaca energije (kvanti ili fotoni) koja se kreću brzinom svetlosti i pritom osciluju u svim mogućim pravcima u odnosu na pravac prostiranja.

Prirodni elektromagnetni talasi zbog toga spadaju u poprečne talase.

Sve elektromagnetne talase delimo prema talasnim dužinama i njihovim osobinama ili prema načinu kako ih mi ljudi upotrebljavamo, a ta podela se naziva spektar elektromagnetnih talasa:



Spektar je dat po opadajućim talasnim dužinama, a rastućoj frekvenciji. Prema kosmičkim zracima energija pojedinačnih fotona raste, tako da je već kod tvrdih ultraljubičastih zraka dovoljno

velika da pojedinačni foton može izazvati štetu pri prolasku kroz tkivo živih bića. Zato odatle počinje opasno zračenje, pri čemu su najopasniji γ - zraci i kosmički zraci.

Izvor svih ovih talasa, izuzev kosmičkih zraka, je naše Sunce, tj. svaka zvezda. Kosmički zraci imaju tako veliku energiju pojedinačnih fotona da se mogu stvarati samo u retkim i »egzotičnim« procesima kao što je anihilacija materije sa antimaterijom.

Radio i mikro talase možemo proizvoditi pomoću antena.

Pritom je vrlo važno ograničenje da talasna dužina ne može biti kraća od veličine izvora:

$$\lambda \geq d .$$

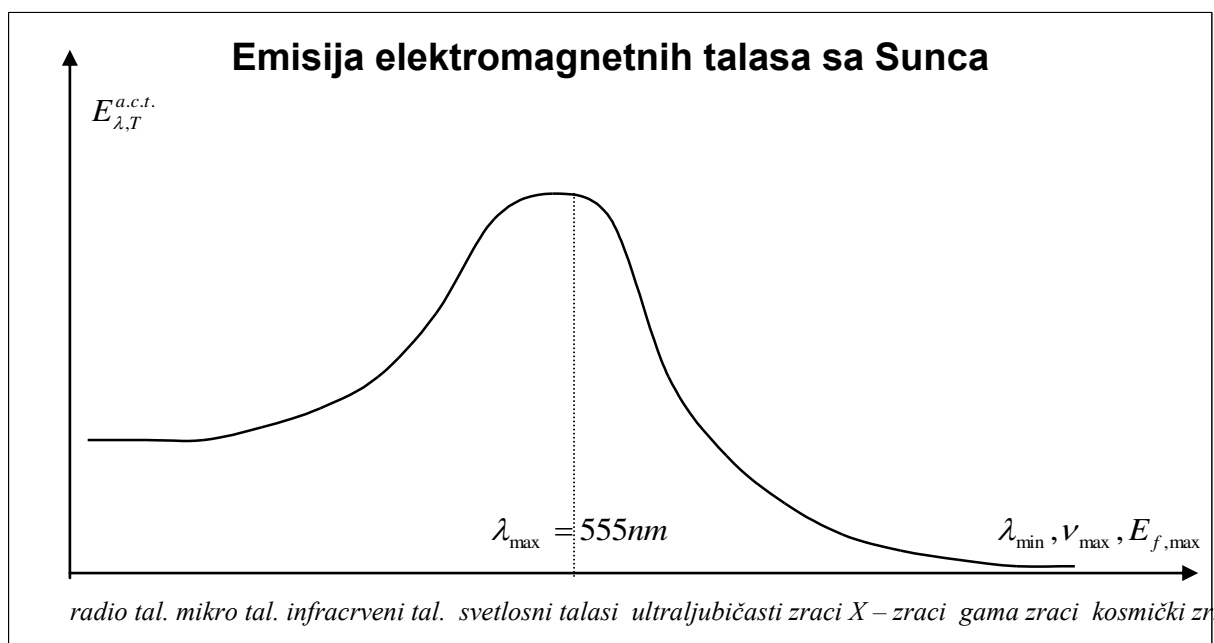
Ovo ograničenje onemogućava da pomoću izvora velikih dimenzija proizvodimo talase kratkih talasnih dužina, dakle opasno zračenje. Na primer ne možemo radio antenama proizvoditi X – zrake ili γ - zrake.

Infracrveni talasi, svetlost, ultraljubičasti i X – zraci se emituju iz elektronskih omotača atoma, tj. njihov izvor su atomi.

γ - zrake ne mogu emitovati atomi jer su preveliki, ali mogu atomska jezgra.

Kosmičke zrake mogu emitovati samo pojedinačne elementarne čestice.

Sunce ne proizvodi jednaku količinu različitih elektromagnetnih talasa. Kako izgleda emisija zračenja sa Sunca prikazano je na sledećem grafiku:



grafik 1.

Svetlost

Od svih zračenja Sunce emituje najviše svetlosne talase. To je razlog zašto vidimo baš svetlost. U pitanju je princip svrsishodnosti u evoluciji. Naime, logično je da se naše čulo vida razvije u vezi sa zračenjem koga ima najviše u Sunčevom zračenju. Da, recimo, vidimo pomoću γ - zraka, tada nam Sunce baš i ne bi bilo od neke pomoći, zato što emituje vrlo malo ovog zračenja, a skoro ništa od toga ne stiže na površinu naše planete zato što ga atmosfera dobro apsorbuje.

Maksimum sunčevog zračenja je na talasnoj dužini: $\lambda_{\max} = 555\text{nm}$ što je inače u vezi sa njegovom površinskom temperaturom. To znači da bi maksimum zračenja neke toplije zvezde bio pomećen ka kraćim talasnim dužinama, tj. prema ultraljubičastom području. Naprotiv, kod hladnijih zvezda od naše maksimum zračenja bi bio pomećen ka većim talasnim dužinama, tj. prema infracrvenom području. To dalje znači da bi eventualna živa bića, koja žive u sistemu zvezde koja je recimo hladnija od naše zvezde, videla infracrveno zračenje a ne svetlost (kao u naučno – fantastičnom filmu »Predator«).

Talasna dužina od 555 nm je u zelenoj boji. Kako je, dakle, zelena svetlost najprisutnija u sunčevoj svetlosti nije čudo da se naše oči najmanje umaraju gledajući zelenu boju, pošto su najviše naviknute na upravo ovu boju. Iz istog razloga zelena boja deluje smirujuće kako na čoveka tako i na mnoge životinje. Usput, netačno je verovanje da se oči odmaraju gledajući zelenu boju, oči se jedino odmaraju kada zažmurimo.

Radio talasi

Najvažnija upotreba radio talasa je za prenos radio emisija od radio stanica do slušaoca. Danas se, u te svrhe, najviše koriste srednji radio talasi (AM – amplitudna modulacija) i ultrakratki radio talasi UKT (FM – frekventna modulacija).

Srednji se mogu emitovati sa bilo koje tačke zemljine površine i da se, ako je predajnik dovoljno jak, »čuju« na celoj našoj planeti. Ovo je moguće zato što se srednji talasi reflektuju o sloj zemljine atmosfere koji se naziva jonosfera i koji počinje na oko 100 km iznad površine.

UKT se ne reflektuju o jonosferu pa je ove radio stanice moguće »primati« samo ako emitovani talas stiže pravolinijski do posmatrača. Za lokalne radio stanice to znači da predajnu antenu treba da postave na neko visoko mesto (brdo, visoka zgrada itd.). Međutim, postoji i mogućnost da se njihov program emituje preko satelita. To su geostacionarni sateliti koji orbitiraju oko Zemlje tako da se nalaze uvek nad istom tačkom zemljine površine. Iz jednog ovakvog satelita je vidljiva trećina površine naše planete. Dakle, sa tri ovakva satelita raspoređena oko Zemlje moguće je pokriti celu njenu površinu.

Prednost UKT u odnosu na srednje radio talase je u manjem izobličenju emitovanog signala.

Radio talasi su važni i u astronomiji jer ih emituju zvezde ali i druga tela kao recimo kvazari. Astronomi hvataju ove emisije pomoću posebnih radio – teleskopa. Jedan od projekata u kome se hvataju radio talasi koji nam stižu iz svemira je i SETI – potraga za vanzemaljskom inteligencijom. Ali i sve ostale vrste elektromagnetnih talasa su značajne za astronomiju na sličan način kao i radio talasi i svetlost.

Mikro talasi

Mikro talasi su televizijski talasi, radarski talasi, služe za emitovanje vojnih i policijskih radio stanica, mobilnu telefoniju, toki – voki uređaje itd. Ispod $\lambda = 1.4\text{ mm}$ počinju »toplotni« talasi. To znači da kada prolaze kroz materijale izazivaju njihovo veće ili manje zagrevanje – upotreba im je u mikrotalasnim rečnicima.

Infracrveni talasi

Isto kao mikro talasi i oni zagrevaju materijale kroz koje prolaze, međutim njih i emituju tela toplija od svoje okoline. To na primer čini i naše telo. Ovo zračenje je nevidljivo, ali se može učiniti vidljivim pri prelamanju kroz specijalna stakla. To se zasniva na činjenici da se brzina svetlosti smanji pri ulasku svetlosti iz vazduha u staklo, a da pritom njena frekvencija ostaje nepromenjena. Kako važi veza:

$$c = \nu \cdot \lambda$$

jasno je da to dovodi do skraćivanja talasne dužine. Na taj način infracrveno zračenje pri prelamanju može da dovoljno skрати svoju talasnu dužinu da postane vidljiva svetlost crvene boje.

Ultraljubičasti zraci

Meki ultraljubičasti zraci su bezopasni, za razliku od tvrdih. I jednih i drugih ima u sunčevom zračenju.

Meki ultraljubičasti zraci:

- izazivaju pigmentaciju kože, a to je uzrok da pocrnimo kada se sunčamo,

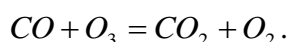
- transformišu neaktivni oblik vitamina D (tzv. provitamin D), koga ima u potkožnom tkivu čoveka, u aktivni oblik koji organizam može da koristi,
- ubijaju neke vrste virusa, pa se zato koriste u medicini za lečenje nekih virusnih kožnih oboljenja kao što je na primer herpes zoster, itd.

Tvrđi ultraljubičasti zraci:

- jako zagrevaju kožu što izaziva dva nepovoljna efekta. Prekomerno zagrevanje izaziva i prekomerno sušenje kože, što rezultuje pojavom bora na njoj. Istraživanja pokazuju da prosečna Australijanka od 25 godina ima isto izboranu kožu kao Engleskinja od 50 godina. Razlog je mnogo veći prosečan broj sunčanih dana u godini u Australiji nego u Engleskoj. Drugi efekat je pojava opekotina na koži pri sunčanju.

- izazivaju rak kože, pa je mnogo veći broj obolelih od raka kože u onim oblastima koje imaju veliki prosečan broj sunčanih dana u godini.

Prirodan štiti od njihovog dejstva je ozonski omotač u atmosferi Zemlje. Ozon je alotropska modifikacija kiseonika. Molekul običnog kiseonika sadrži dva atoma - O_2 , a molekul ozona sadrži tri atoma kiseonika - O_3 . Ozon je gas koji je lakši od vazduha pa se zato nalazi u sloju zemljine atmosfere od 20 do 50 km visine iznad zemljine površine. U malim koncentracijama ima osvežavajući miris koji liči na miris dezodoransa, dok je u velikim koncentracijama njegov miris izuzetno neprijatan. Kako se stvara u ekstremnim uslovima koji vladaju u kanalu munje, možemo osetiti njegov miris za vreme i posle jakog nevremena, kao što se letnje oluje. No ovaj miris se vrlo brzo izgubi zato što se ozon vrlo brzo penje u više slojeve atmosfere. Ozon je opasan zato što je jako otrovan za čoveka, ali i naša jedina zaštita od tvrdog ultraljubičastog zračenja sa Sunca zato što ga dobro apsorbuje. Jedan od važnijih problema modernog doba je i primećeno smanjivanje koncentracije ozona u atmosferi. Postoji više razloga za ove tzv. ozonske rupe. Najvažniji faktor koji uništava ozon je sunčevo čestično zračenje koje je u poslednjih nekoliko decenija značajno pojačano, a koje može da prodre duboko u atmosferu Zemlje iznad magnetnih polova. Upravo zato su najveće ozonske rupe baš u polarnim područjima. U poslednje vreme naučnici su otkrili da dolazi do značajnih poremećaja zemljinog magnetnog polja, koje nas štiti od pomenutog čestičnog zračenja sa Sunca, pa je i to razlog za ubrzano uništavanje ozonskog omotača. Međutim, uzroci smanjenja ozona su i razne vrste zagađenja koje izaziva čovek. Naročito su značajne sve vrste monoksida kao što je recimo ugljen monoksid - CO koga stvaraju brzim sagorevanjem turbo mlazni motori aviona. Tako stvoren ugljen monoksid se jedini sa ozonom u sledećoj hemijskoj reakciji:



Slično dejstvo imaju i svi freoni. Njih ima u rashladnim uređajima, ali i u svim vrstama sprejeva kao što su dezodoransi itd.

X – zraci

Njih je otkrio Vilhelm Rentgen tako što je bombardovao metalnu ploču mlazom elektrona. U prvo vreme on nije znao kakvo je ovo zračenje pa ga je nazvao X – zračenje (zato što je u matematici X oznaka za nepoznato). Koristimo ga u rentgen aparatima, ali je ono vrlo opasno jer izaziva radijacionu bolest kao i pojavu raka u organizmu. Zato rentgensko snimanje treba koristiti samo kada od ovog snimka zavisi život. Umesto njega može se u većini slučajeva koristiti bezopasno snimanje pomoću ultrazvuka, s tim što ultrazvučni snimak nije tako jasan kao rentgenski.

γ - zraci

Javljuju se pri nuklearnim procesima fisije i fuzije, kao i pri anihilaciji materije sa antimaterijom. Vrlo su opasni, a od njih je se vrlo teško zaštititi jer prodiru i kroz nekoliko metara debele olovne ploče.

Kosmički zraci

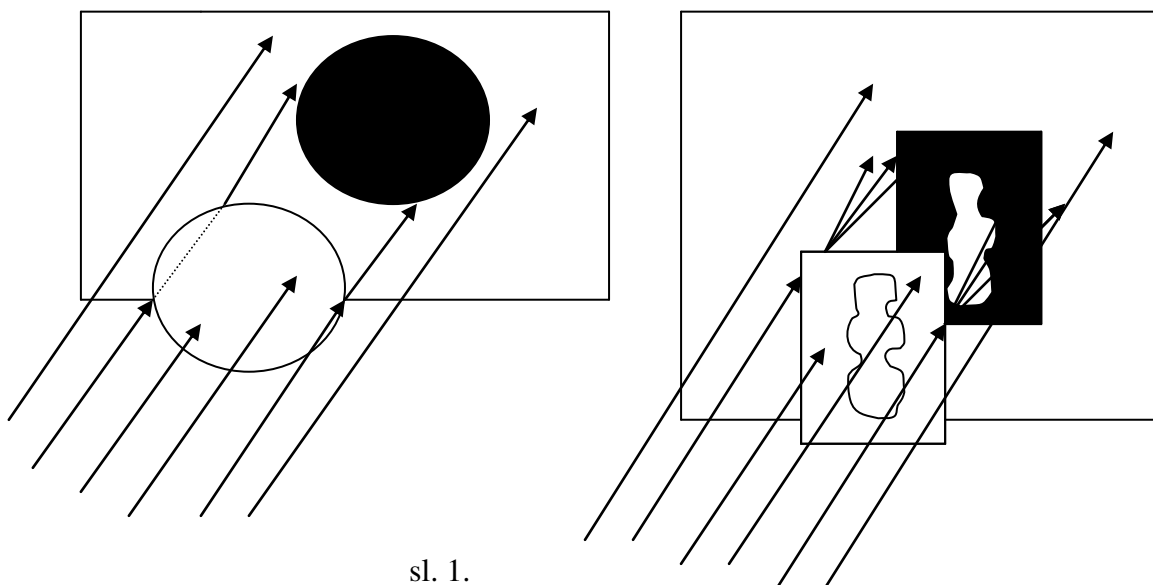
Oni su najopasniji jer fotoni ovog zračenja nose najveću pojedinačnu energiju. Stvaraju se u procesima anihilacije. Srećom ovo zračenje je vrlo retko u prirodi.

Difrakcija svetlosti

Difrakcija je pojava skretanja svetlosnog zraka sa pravolinijske putanje. Difrakcija se javlja u sledeća tri slučaja:

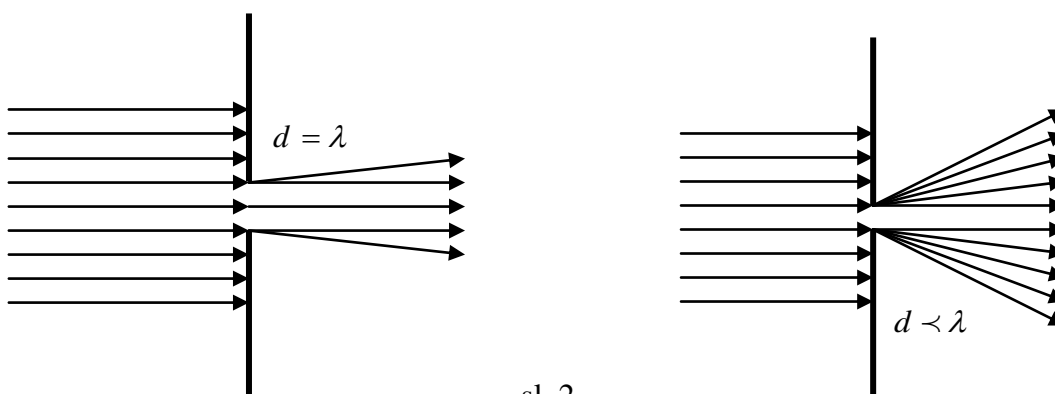
1. Kada svetlost naiđe na oštre ivice nekog predmeta.

U vezi sa ovim slučajem je oštrina senki različitih predmeta. Naime, senka je posledica pravolinijskog prostiranja svetlosti pored predmeta. Zbog toga iza predmeta postoji deo na zaklonu do koga svetlost ne može da stigne i taj deo na zaklonu je senka predmeta. Najbolje će se razumeti šta je u pitanju na sledećem problemu. Da li je jasnija senka lopte ili žileta? Trebalo bi da, na osnovu zdravog razuma, ove dve senke imaju podjednako jasno definisanu granicu, tj. da budu podjednako oštre. Ako već ove dve senke nisu podjednako oštro ocrtane onda bi smo mogli eventualno očekivati da je senka žileta oštrije ocrtana na zaklonu, jer žilet ima oštre ivice. Međutim, rešenje je da je granica svetlosti i senke na zaklonu jasnije ocrtana kod lopte nego kod žileta. Uzrok je difrakcija. Prolazeći pored lopte svetlost ne difraktuje ili je ta difrakcija minimalna, dok prolazeći pored žileta svetlost pravi značajnu difrakciju na njegovim oštrim ivicama. Zbog toga difraktovani deo svetlosti ulazi u granično područje senke i čini taj deo delimično osvetljenim.



2. Kada svetlost prolazi kroz otvor koje je manji od talasne dužine te svetlosti ili joj je jednak.

U ovom slučaju svetlost pravi karakterističnu difrakcionu lepezu što se vidi na sl. 2. U stvari difrakciona lepeza je prisutna u sva tri slučaja u kojima se difrakcija javlja, što se može videti i na sl. 1. i na sl. 4.

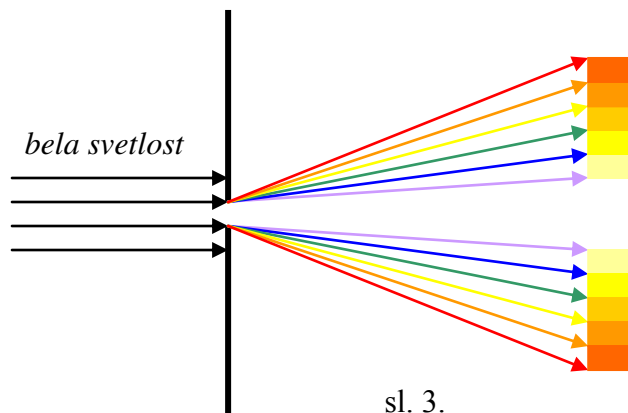


Ono što je značajno je da veći deo svetlosti prolazi pravolinijski, dok samo deo svetlosti difraktuje u obliku lepeze. Na sl. 2. se vidi da je širina difrakcione lepeze veća što je otvor manji od talasne dužine svetlosti.

Kako različite boje svetlosti imaju različitu talasnu dužinu sada je opravdano sledeće pitanje: a koja boja svetlosti pravi najširu difrakcionu lepezu pri prolasku kroz isti otvor, koji ima npr. veličinu $d = 390 \text{ nm}$?

Odgovor glasi da je najšira difrakciona lepeza crvene boje jer od njene talasne dužine od $\lambda = 750 \text{ nm}$ ovaj otvor je skoro dvostruko manji. Najuža je difrakciona lepeza ljubičaste svetlosti zato što je njena talasna dužina od $\lambda = 390 \text{ nm}$ jednaka veličini ovog otvora.

Situacija postaje prilično složena kada se razmatra difrakcija kompleksne bele svetlosti kroz mali otvor, zato što je bela svetlost mešavina svih boja svetlosti iz spektra. Tada svaka od ovih boja ima svoju posebnu širinu difrakcione lepeze, što je prikazano na sl. 3.



sl. 3.

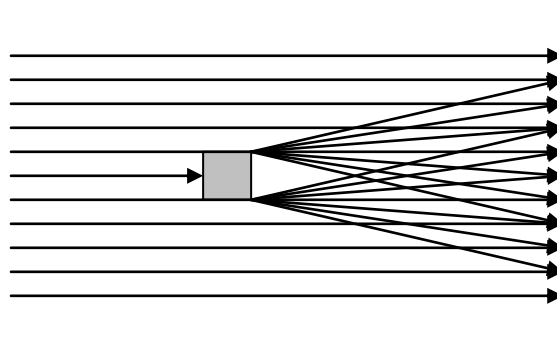
Zraci u boji pokazuju kolika je širina difrakcione lepeze svake pojedinačne boje svetlosti.

U centru su prisutne sve boje pa je centar zaklona osvetljen belom svetlošću.

Korak dalje od središta zaklona zaklon je osvetljen svetlo žutom bojom svetlosti zato što u njoj nedostaje ljubičasta boja, pa mešavina preostalih boja nije više bela, nego je svetlo žuta. Kako se pomeramo od središta zaklona prema rubovima, on je osvetljen sve tamnije žutom svetlosti (zato što u njoj sada nedostaju: modra i plava, pa korak dalje i zelena svetlost itd.) koja postepeno prelazi u narandžastu, da bi na samom rubu osvetljenog područja ono bilo osvetljeno samo crvenom bojom svetlosti.

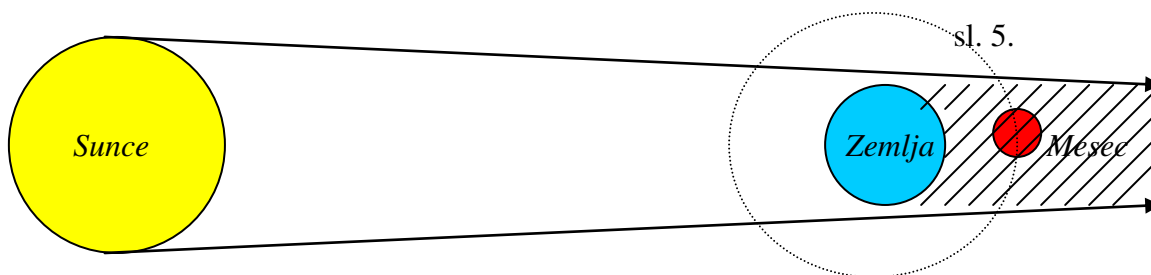
3. Kada svetlost naiđe na telo (prepreku) čije su dimenzije jednake ili manje od talasne dužine te svetlosti.

Ovo opet kao i prvi slučaj ima veze sa senkom tela. Ako je telo malo, tj. ako je jednako ili manje od talasne dužine svetlosti tada ono praktično nema senku što je prikazano na sl. 4. To znači da ne možemo videti senke molekula ili atoma zato što su njihove dimenzije mnogo manje od talasne dužine svetlosti. Veličina molekula je oko 0.1 nm , dok je talasna dužina svetlosti od 750 do 390 nm . Tako ne možemo iskoristiti poznatu situaciju kada je senka značajno veća od predmeta koga osvetljavamo, ako izvor svetlosti jako primaknemo predmetu, a zaklon maksimalno udaljimo. Na sl. 4. se vidi da se područje senke nalazi samo u malom delu prostora neposredno iza tela, dok je udaljeni zaklon potpuno osvetljen.



sl. 4.

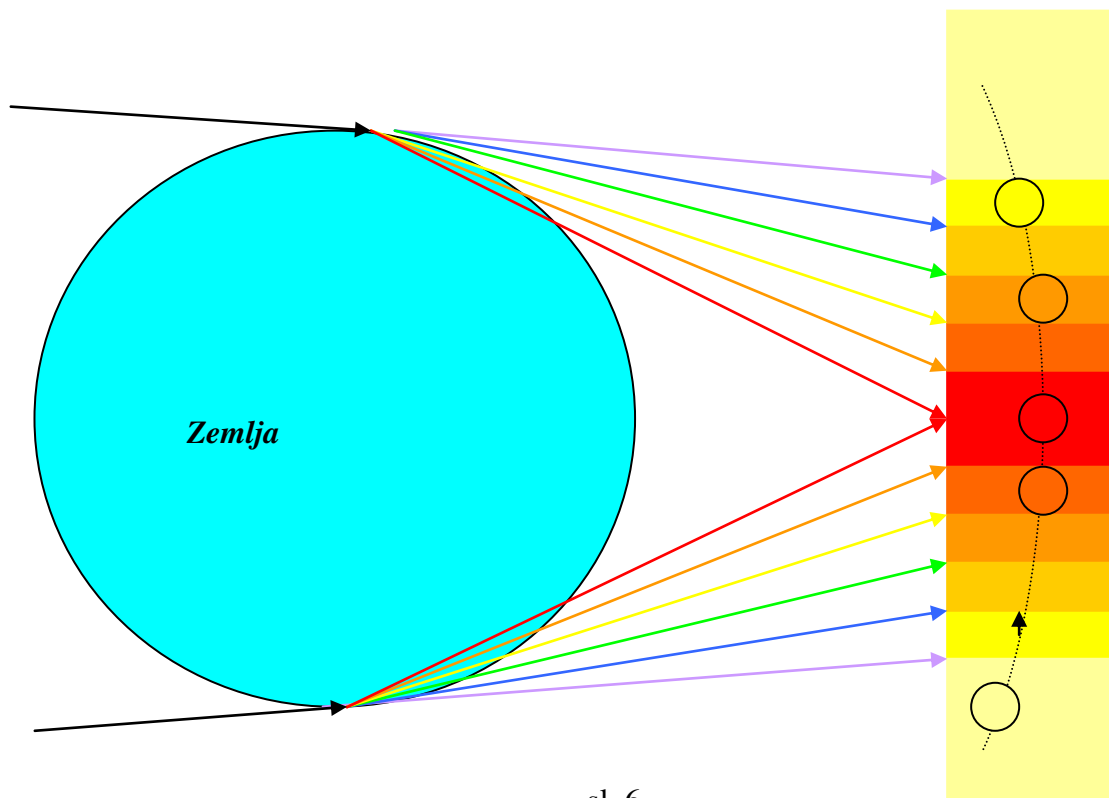
Zanimljiv primer difrakcije svetlosti se javlja pri pomračenju Meseca. Geometrija ove pojave je prikazana na sledećoj slici.



sl. 5.

Na sl. 5. vidi se da je Mesec dovoljno mali da potpuno uđe u zemljinu senku. To znači da bi Mesec tada trebalo da bude potpuno taman zato što on nema izvore svetlosti na svojoj površini. Mesec je normalno vidljiv zato što reflektuje sunčevu svetlost sa svoje površine. Međutim, kada uđe u senku iza Zemlje do Meseca više ne bi trebalo da stiže svetlost sa Sunca, a to znači da bi trebalo da bude potpuno pomračen, tj crn. Ipak za vreme pomračenja Mesec menja svoju boju iz normalne svetlo – žute u narandžastu, da bi na vrhuncu svog pomračenja bio krvavo crven. Pri izlasku iz senke Mesec menja svoju boju ponovo u narandžastu, a onda u normalnu svetlo – žutu boju.

Objašnjenje je sledeće: sunčeva svetlost difrakuje prolazeći pored Zemlje (na recimo oštrim ivicama planinskih grebena), a pritom ne treba izgubiti iz vida da je sunčeva svetlost kompleksna bela svetlost. Kao i na sl. 3. javlja se različita širina difrakcione lepeze za različite boje svetlosti. Na sledećoj slici prikazan je prolazak Meseca kroz različito “obojene“ delove senke.



sl. 6.

Pojava pomračenja Mesca je prilično česta i dešava se 2 do 4 puta godišnje. Ljudi su dugo pojavu crvenog Meseca tumačili kao najavu neke velike nesreće.

Interferencija svetlosti

Interferencija je pojava koja se zasniva na I i II slučaju slaganja dva koherentna svetlosna talasa.

Da bi dve svetlosti bile koherentne moraju da imaju istu talasnu dužinu, a to znači da imaju istu nijansu iste boje.

Da bi se interferencija desila potrebno je da se te dve koherentne svetlosti sretnu u istom smeru i da imaju jednake amplitude, tj. da budu istog intenziteta. Tada su moguća dva slučaja:

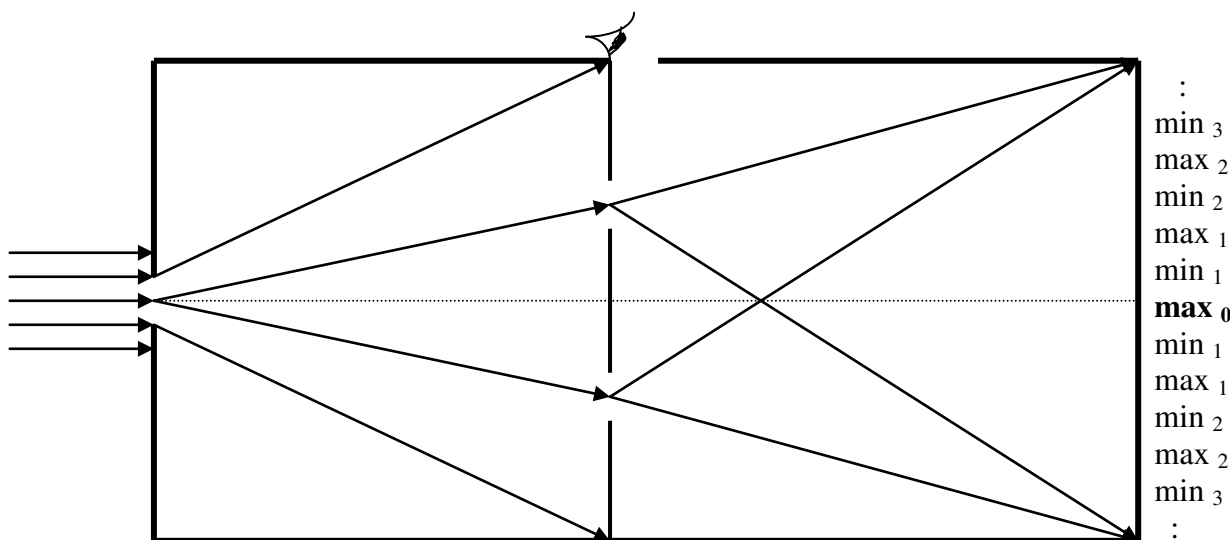
1. Konstruktivna interferencija

Javlja se na onim mestima gde se te dve svetlosti sretnu u istoj fazi (breg sa bregom, a dolja sa doljom). Na tim mestima dolazi do njihovog slaganja u rezultujući talas pa su ta mesta osvetljena.

2. Destruktivna interferencija

Javlja se na onim mestima gde se te dve svetlosti sretnu u suprotnoj fazi (breg jednog sa doljom drugog talasa). Na tim mestima se ove dve svetlosti ponište (zbog jednakih amplituda), pa su ta mesta neosvetljena (tamna).

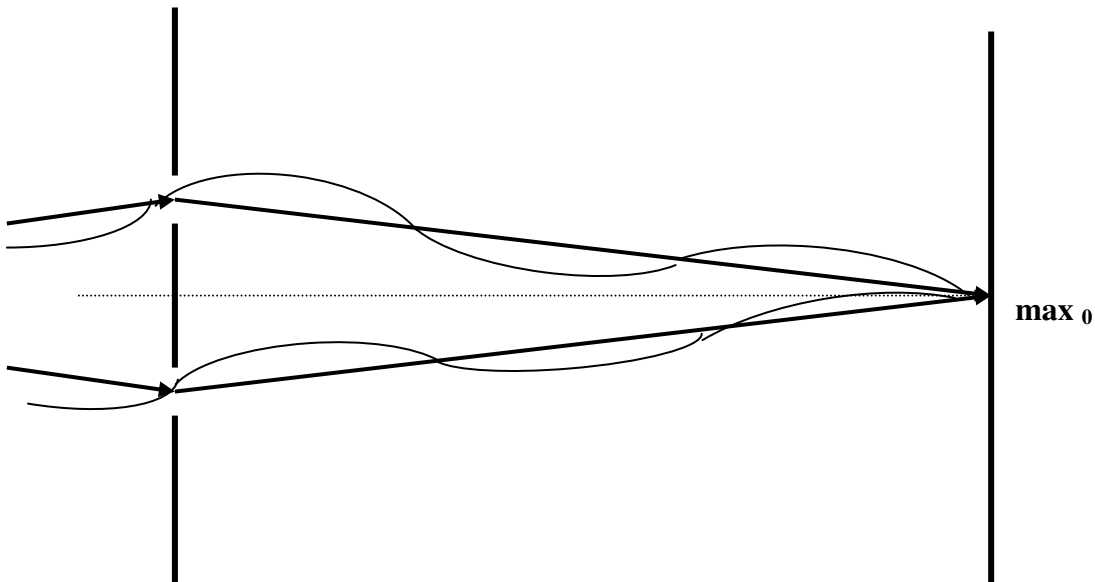
Interferenciju posmatramo na primeru Jungovog eksperimenta sa dve rupice.



sl. 7.

Svetlost ulazi u kutiju kroz mali otvor čija je veličina manja od talasne dužine svetlosti. Zbog toga dolazi do difrakcije tako podešene da difrakciona lepeza osvetljava celu središnju pregradu u kutiji. Na ovoj pregradi se nalaze dve male rupice, simetrično raspoređene u odnosu na zamišljenu središnju osu kutije. Deo difraktovane svetlosti iz ulaznog otvora stiže do ove dve rupice i prolazeći kroz njih difrakuje tako da je ceo zadnji zid kutije osvetljen svetlošću i iz jedne i iz druge rupice. Ako bi jedna od ove dve rupice bila zatvorena tada, a samo jedna otvorena tada bi ceo zadnji zid kutije bio osvetljen. Međutim, kada su obe rupice otvorene svetlosti koje iz njih stižu na zadnji zid kutije vrše interferenciju, pa su neka mesta na zadnjem zidu kutije osvetljena – to su maksimumi, a neka su neosvetljena – to su minimumi.

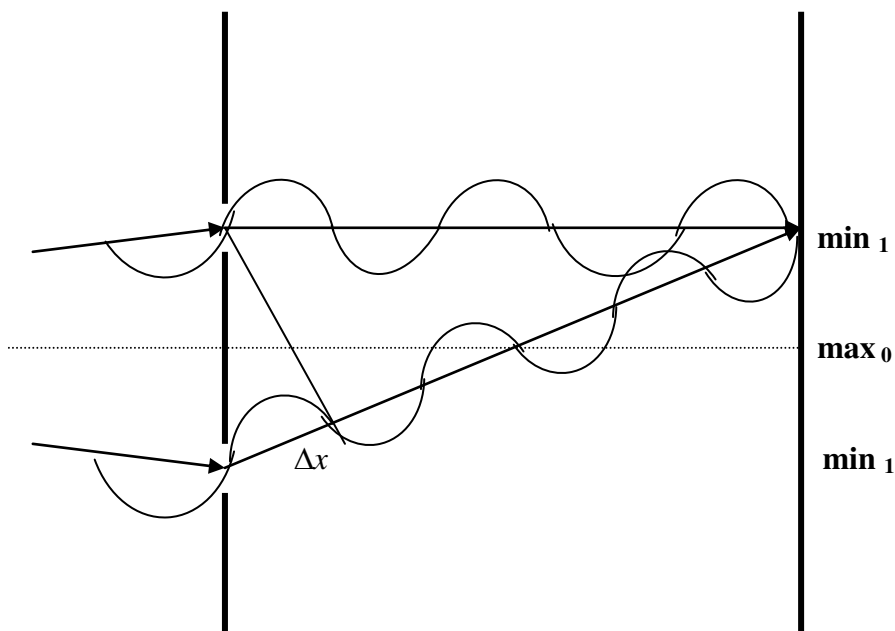
Na sledećoj slici je prikazan razlog zašto se na sredini zadnjeg zida kutije nalazi maksimum. Ovaj maksimum se naziva središnjim maksimumom ili maksimumom nultog reda. Na sledećim slikama prikazana je samo zadnja polovina kutije, radi jednostavnosti.



sl. 8.

Kako svetlost, koja stiže u dve rupice, potiče iz istog izvora posledica je da u obe rupice stiže u istoj fazi. Na sl. 8. u rupice stiže doljom, a iz njih nastavlja bregom. Kako do zadnjeg zida kutije svetlosni zraci iz oba otvora treba da pređu isto rastojanje, a i kako su im talasne dužine jednake, zaključak je da će ova dva zraka na zaklon stići u istoj fazi (na sl. 8. oni na zaklon stižu bregom) pa će doći do konstruktivne interferencije.

Na sl. 9. prikazan je razlog da se iznad nultog maksimuma javi minimum prvog reda, tj. neosvetljeno mesto na zaklonu.



sl. 9.

Na sl. 9. vidi se da putevi zraka iz dve rupice nisu jednaki, već da se razlikuju za dužinu koja je obeležena sa Δx i koja se naziva putna razlika. Minimum prvog reda nastaje zato što je putna razlika na tom mestu jednaka polovini talasne dužine upotrebljene svetlosti

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}.$$

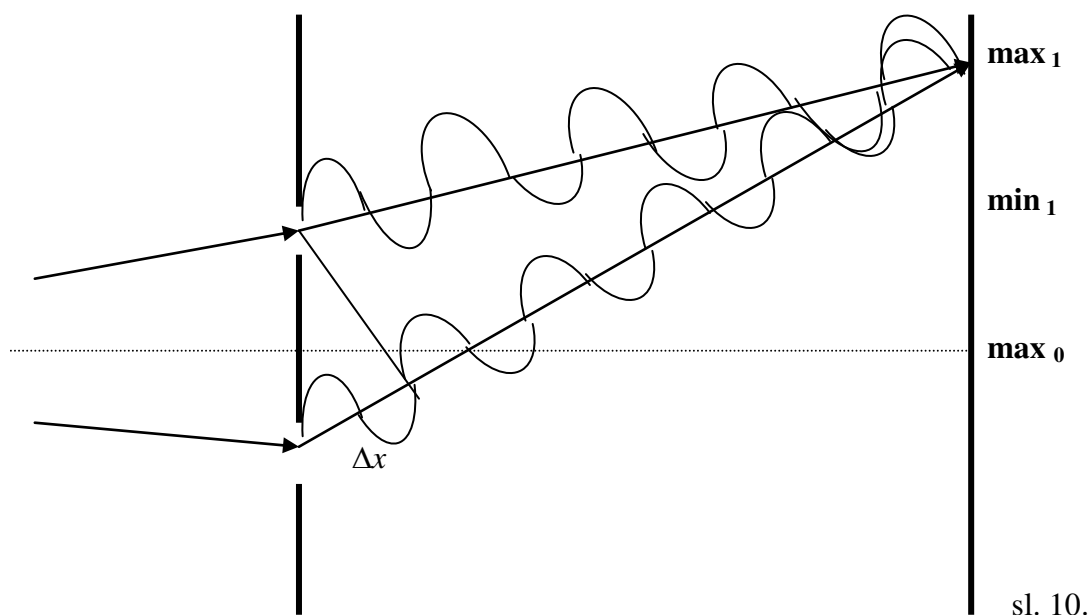
Zato se “kviri” ista faza koju dva svetlosna zraka imaju pri ulasku u dve rupice. Naime donji zrak na putnu razliku “potroši” svoj breg, pa na jednak put do zaklona kreće u suprotnoj fazi sa gonjim zrakom, a posledica je da se na zaklonu oni sreću u suprotnoj fazi što je uzrok njihovog poništavanja, pa je to mesto na zaklonu neosvetljeno.

Sada lako možemo zamisliti mesto na zaklonu koje se nalazi sa donje strane centralnog maksimuma, a koje je od njega jednako udaljeno kao mesto u kome se javlja gornji minimum prvog reda. U njemu je takođe minimum prvog reda jer do tog mesta, iz razloga simetrije, gornji zrak ima duži put od donjeg zraka za polovinu talasne dužine.

Ovo znači da su minimumi i maksimumi višeg reda simetrično raspoređeni u odnosu na centralni maksimum, što je vidljivo na sl. 7.

Značajno je uočiti da, ako tačku susreta dva zraka udaljavamo od centralnog maksimuma, dolazi do povećanja putne razlike Δx .

Posledica je da ako se tačka susreta pomeri naviše (ili naniže), u odnosu na minimum prvog reda, za rastojanje jednako rastojanju centralnog maksimuma i minimuma prvog reda tada je putna razlika dvostruko veća nego na sl. 9. a to znači da je jednaka celoj talasnoj dužini. Ovo je prikazano na narednoj sl. 10.



sl. 10.

Kako donji zrak sada na putnu razliku “troši” celu talasnu dužinu, na isti put do tačke susreta polazi u istoj fazi sa gornjim zrakom, pa se na zaklonu sa njime sreće u istoj fazi, što je uslov za konstruktivnu interferenciju u toj tački.

Na osnovu prethodnih primera i uz malo razmišljanja može se doći do opšteg zaključka da veličina putne razlike Δx određuje da li će doći do konstruktivne ili destruktivne interferencije i to na sledeći način:

- konstruktivna interferencija nastaje na onim mestima na zaklonu do kojih je putna razlika:

$$\Delta x = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots \quad \text{tj.}$$

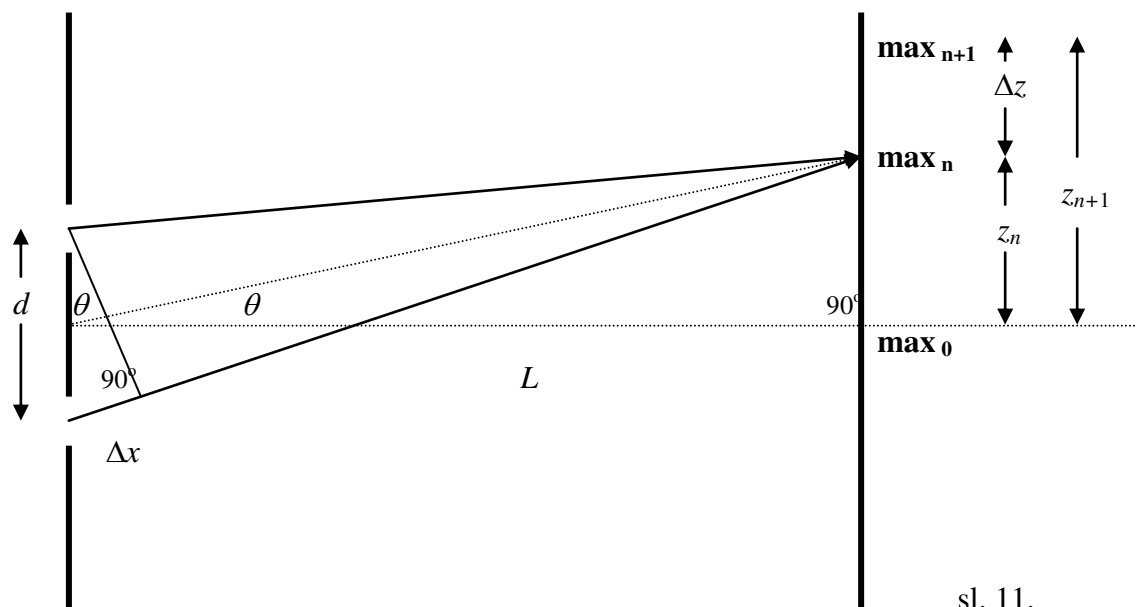
$$\Delta x = n \cdot \lambda \quad \text{gde je } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

- destruktivna interferencija nastaje na onim mestima na zaklonu do kojih je putna razlika:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2} \dots \quad \text{tj.}$$

$$\Delta x = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{gde je } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Izvođenje rastojanja nultog maksimuma i maksimuma n – tog reda z_n



Na slici su dva pravouglata trougla sa oštrim uglom θ i iz njih sledi:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{z_n}{L} \quad \text{i} \quad \sin \theta = \frac{\Delta x}{d}.$$

Ako je θ jako mali ugao (a u realnom slučaju on to i jeste) tada su vrednosti tangensa i sinusa ovog ugla približno jednake:

$$\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$$

pa je:

$$\frac{z_n}{L} = \frac{\Delta x}{d}.$$

Sledi:

$$z_n = \frac{\Delta x \cdot L}{d}.$$

Kako je z_n rastojanje do n – tog maksimuma, možemo za putnu razliku uzeti uslov konstruktivne interferencije:

$$\Delta x = n \cdot \lambda,$$

pa je konačno:

$$z_n = \frac{n \cdot \lambda \cdot L}{d}.$$

Rastojanje od centralnog maksimuma do $n + 1$ maksimuma bi, na osnovu prethodnog, bilo:

$$z_{n+1} = \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot L}{d}.$$

Izvođenje rastojanja dva susedna maksimuma Δz

Sa slike se vidi da je:

$$\Delta z = z_{n+1} - z_n$$

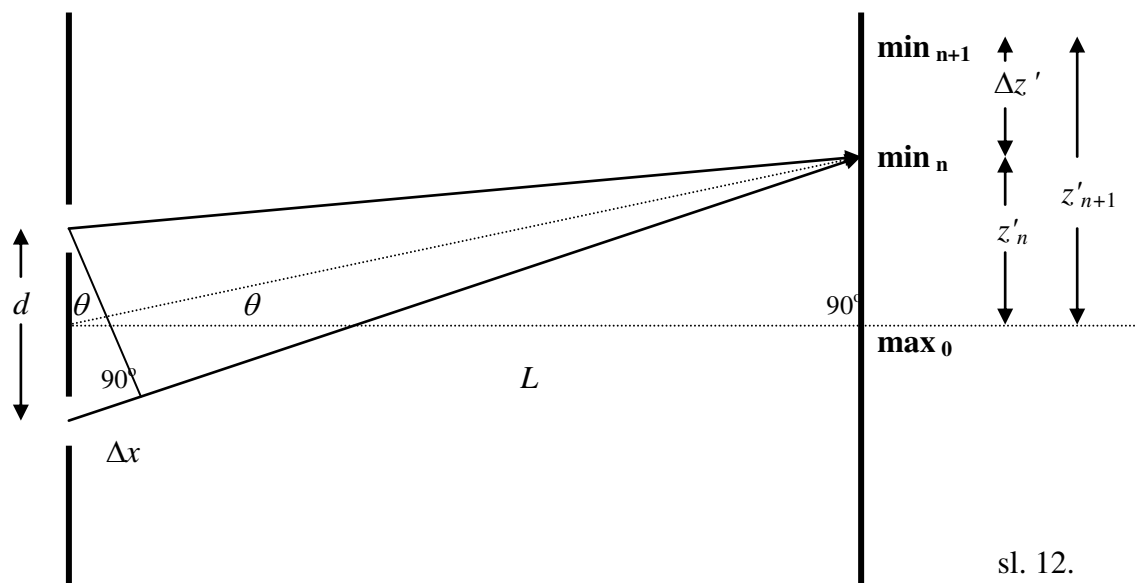
Zamenom prethodno izvedenih izraza dobija se:

$$\begin{aligned} \Delta z &= \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot L}{d} - \frac{n \cdot \lambda \cdot L}{d} \\ \Delta z &= \frac{n \cdot \lambda \cdot L + \lambda \cdot L - n \cdot \lambda \cdot L}{d} \end{aligned}$$

i konačno:

$$\Delta z = \frac{\lambda \cdot L}{d}.$$

Izvođenje rastojanja nultog maksimuma i minimuma n – tog reda z'_n



sl. 12.

Kao i u prethodnom slučaju na slici su dva pravouglata trougla sa oštrim uglom θ i iz njih sledi:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{z'_n}{L} \quad \text{i} \quad \sin \theta = \frac{\Delta x}{d}.$$

Ako je θ jako mali ugao (a u realnom slučaju on to i jeste) tada su vrednosti tangensa i sinusa ovog ugla približno jednake:

$$\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$$

pa je:

$$\frac{z'_n}{L} = \frac{\Delta x}{d}.$$

Sledi:

$$z'_n = \frac{\Delta x \cdot L}{d}.$$

Kako je z_n rastojanje do n – tog minimuma, možemo za putnu razliku uzeti uslov destruktivne interferencije:

$$\Delta x = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

pa je:

$$z'_n = \frac{(2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot L}{d},$$

i konačno:

$$z'_n = \frac{(2n + 1) \cdot \lambda \cdot L}{2d}.$$

Rastojanje od centralnog maksimuma do $n + 1$ minimuma bi, na osnovu prethodnog, bilo:

$$z'_{n+1} = \frac{(2 \cdot (n + 1) + 1) \cdot \lambda \cdot L}{2d},$$

ili:

$$z'_{n+1} = \frac{(2n + 2 + 1) \cdot \lambda \cdot L}{2d},$$

a konačno:

$$z'_{n+1} = \frac{(2n + 3) \cdot \lambda \cdot L}{2d}.$$

Izvođenje rastojanja dva susedna minimuma $\Delta z'$

Sa slike se vidi da je:

$$\Delta z' = z'_{n+1} - z'_n$$

Zamenom prethodno izvedenih izraza dobija se:

$$\Delta z' = \frac{(2n+3) \cdot \lambda \cdot L}{2d} - \frac{(2n+1) \cdot \lambda \cdot L}{2d}$$

$$\Delta z' = \frac{2n \cdot \lambda \cdot L + 3\lambda \cdot L - 2n \cdot \lambda \cdot L - \lambda \cdot L}{2d}$$

$$\Delta z' = \frac{2\lambda \cdot L}{2d}$$

i konačno:

$$\Delta z' = \frac{\lambda \cdot L}{d}$$

Upoređivanjem izraza za Δz i $\Delta z'$ može se videti da su ova dva rastojanja jednaka. Kako su ovo rastojanja dva susedna maksimuma, tj. dva susedna minimuma, iz njihove jednakosti se može izvući zaključak o jednakoj debljini svetlih i tamnih linija na zaklonu.

A kolika je debljina, tj. širina ovih linija na zaklonu u realnom eksperimentu sa dve rupice? Uzmimo da je:

$$\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m},$$

$$L = 1 \text{ m}$$

$$d = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

$$\Delta z = \Delta z' = ?$$

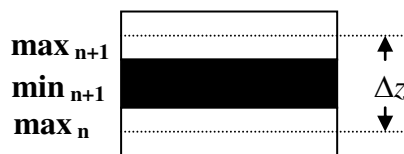
$$\Delta z = \Delta z' = \frac{\lambda \cdot L}{d} = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot 1 \text{ m}}{10^{-1} \text{ m}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 5 \mu\text{m},$$

što iznosi 5 hiljaditih delova jednog milimetra.

Kako je širina svetle linije jednaka polovini izračunate vrednosti $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, sledi da ova širina svetle linije oko $2.5 \mu\text{m}$. Ovo je istovremeno i širina tamne linije na zadnjem zidu kutije.

Na sl. 13. je prikazano rastojanje Δz i vidi se da je ono od sredine donje do sredine gornje svetle linije. To znači da rastojanje Δz obuhvata celu debljinu tamne linije i dve polovine svetle linije, tj. i jednu tamnu i jednu svetlu liniju.

Rastojanje od $2.5 \mu\text{m}$ je jako maleno pa se ovakve svetle i tamne linije ne mogu uočiti golim okom. Dakle, za njihovo posmatranje je potrebno uvećanje.



sl. 13.

Apsolutni indeks prelamanja

Apsolutni indeks prelamanja date sredine jednak je količniku brzine svetlosti u vakuumu i brzine svetlosti u toj sredini:

$$n = \frac{c}{u}$$

Očigledno je da ta sredina mora biti propusna za svetlost, tj. svakodnevnim jezikom rečeno – providna. Ova sredina može biti vakuum ili neka materijalna sredina kroz koju svetlost može da prođe, kao vazduh, voda, staklo...

Apsolutni indeks prelamanja date sredine je bezdimenzioni broj koji može biti jednak jedinici – za vakuum, ili veći od jedinice – za ma koju materijalnu sredinu. Objašnjenje je sledeće:

- ako je sredina vakuum tada je: $u = c$, pa je: $n = \frac{c}{u} = \frac{c}{c} = 1$.

- ako je sredina materijalna, tada je brzina svetlosti u njoj sigurno manja od brzine svetlosti u vakuumu: $u < c$, pa je: $n = \frac{c}{u} > 1$.

Sredina sa većim apsolutnim indeksom prelamanja se naziva – optički gušća. To ne mora da znači da je ona stvarno gušća, iako je obično tako. Sredina je optički gušća ako je svetlost u njoj sporija i ako svetlost pri ulasku u nju skrene sa pravolinijske putanje – zbog prelamanja – za veći ugao. To znači da je apsolutni indeks prelamanja u vezi sa zakonom prelamanja svetlosti i to sa drugim stavom ovog zakona na sledeći način:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ovaj oblik zakona prelamanja svetlosti može se pisati i kao:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Vrsta sredine	Apsolutni indeks prelamanja	Brzina svetlosti (km / s)
vakuum	1	300 000
vazduh	1.0003	≈ 300 000
voda	1.3330	≈ 225 000
staklo	1.6000	187 500
dijamant	2.4200	124 000

Vrednosti brzine svetlosti u datoj materijalnoj sredini u tablici izračunate su pomoću obrasca:

$$u = \frac{c}{n}$$

Apsolutni indeks prelamanja date sredine ima mnogo primena, a jedna od najvažnijih je izračunavanje brzine svetlosti u toj sredini. Naime, dovoljno je izmeriti apsolutni indeks prelamanja te sredine, na bilo koji način, a onda podeliti brzinu svetlosti u vakuumu tim indeksom. Pritom treba znati da postoje veliki praktični problemi pri merenju brzine svetlosti u ma kojoj materijalnoj sredini i da je ovo najbolji način za njeno određivanje.

Jedan od načina za određivanje n je pomoću II stava zakona prelamanja:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta.$$

Dovoljno je znati apsolutni indeks prelamanja jedne od te dve sredine, npr. n_1 , a onda treba izmeriti upadni i prelomni ugao α i β . Tada je jednostavno:

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Važno je naglasiti da svetlost pri ulasku u datu sredinu skokovito menja vrednost brzine, pri čemu joj se menja i talasna dužina tako da njena frekvencija ostaje nepromenjena. Obrazac:

$$v = \frac{u}{\lambda}$$

objašnjava ovakvu promenu talasne dužine. Naime, ako se brzina svetlosti, pri ulasku u sredinu, smanji tada se mora smanjiti i njena talasna dužina da bi njena frekvencija ostala stalna i obrnuto.

Važnu ulogu u teoriji elektromagnetnog polja imaju i sledeće konstante:

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \text{ - apsolutna dielektrička propustljivost vakuuma}$$

ε_r - relativna dielektrička propustljivost date materijalne sredine. Njena vrednost je konstanta za konkretnu materijalnu sredinu, ali se od sredine do sredine razlikuje

$$\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A} \text{ - apsolutna magnetna propustljivost vakuuma i}$$

μ_r - relativna magnetna propustljivost date materijalne sredine. Njena vrednost je konstanta za konkretnu materijalnu sredinu, ali se od sredine do sredine razlikuje.

Zanimljivo je da je:

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \cdot 12.56 \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A} = 111.156 \cdot 10^{-19} \frac{C^2}{Nm^2} \cdot \frac{Tm}{A}.$$

Kako je: $C = Am$, a $T = \frac{N}{Am}$ sledi:

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = \frac{111.156 \frac{A^2 s^2}{Nm^2} \frac{m}{A} \frac{N}{Am}}{10^{19}} = \frac{1}{1000 \cdot 10^{16}} \frac{s^2}{m^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{m^2}{s^2} = \frac{1}{c^2}.$$

Sledi:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}.$$

Takođe se može pokazati da je brzina svetlosti u datoj materijalnoj sredini:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}.$$

Dva poslednja obrasca samo potvrđuju elektromagnetnu prirodu svetlosti.

$$\text{Kako je: } n = \frac{c}{u}, \text{ sledi: } n = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}}$$

tj.

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}.$$

Polarizacija talasa na primeru svetlosti

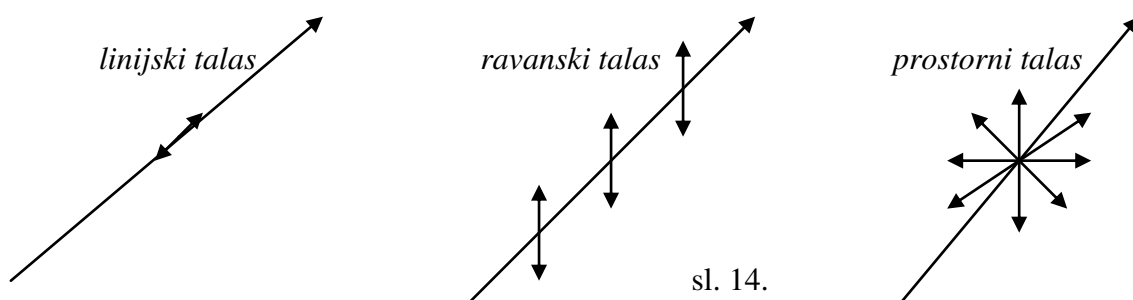
Da bi došli do definicije polarizacije potrebno je izvršiti novu klasifikaciju talasa. Sve talase možemo podeliti na sledeće tri vrste: linijski, ravanski i prostorni.

Talas je linijski ako se pravac oscilovanja nalazi na istoj liniji na kojoj je i pravac prostiranja tog talasa. Tada se celokupno talasno kretanje dešava duž te prave linije. Linijski talasi su u stvari uzdužni talasi.

Talas je ravanski ako pravac oscilovanja normalan na pravac prostiranja talasa. Tada se celokupno talasno kretanje dešava u ravni koju ova dva pravca definišu.

Talas je prostorni ako postoji više pravaca oscilovanja, a svi oni stoje normalno na pravac prostiranja talasa. Tada se talasno kretanje dešava u prostoru koji svi ovi pravci definišu.

Očigledno je da i ravanski i prostorni talasi spadaju u poprečne talase, tj. da predstavljaju dve vrste poprečnih talasa.



sl. 14.

Sada je polarizaciju talasa lako definisati: Polarizacija je pretvaranje prostornog u ravanski talas.

Iz same definicije je jasno da je nemoguće polarizovati uzdužne talase, što znači da, recimo, ne postoji polarizovani zvuk.

Svetlost i ostali prirodni elektromagnetni talasi su prostorni, pa se mogu polarizovati.

Postoje dva uobičajena načina za polarizaciju svetlosti.

Jedan od njih je propuštanje svetlosti kroz kristal. Pritom postoje određeni pravci u kristalu duž kojih dolazi do propuštanja fotona koji osciluju u jednom pravcu, dok svi ostali fotoni (koji osciluju u drugim pravcima) bivaju apsorbovani, što je prikazano na sl. 15. Ravan u kristalu duž koje se vrši polarizacija se naziva ravan polarizacije.

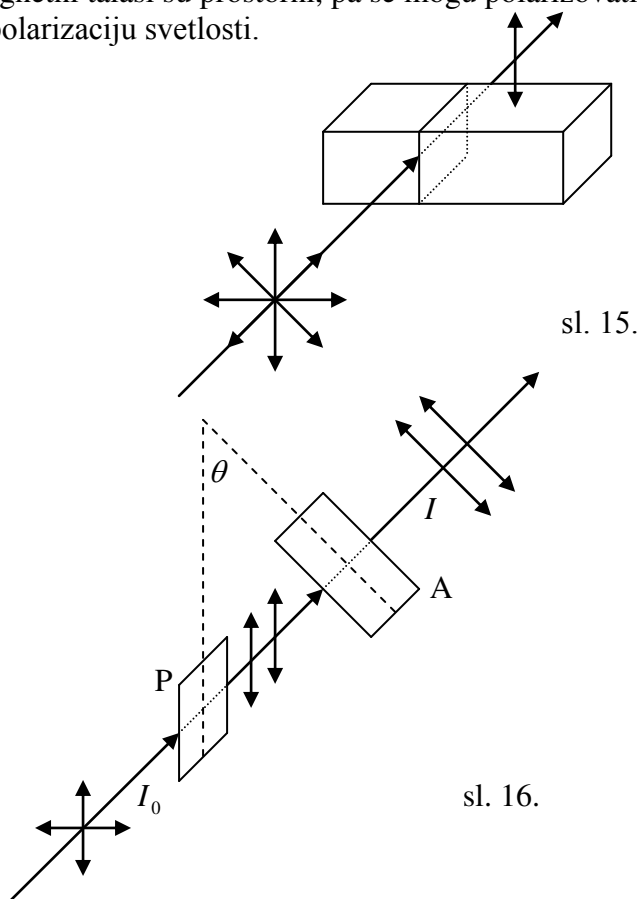
Ako se na put svetlosti postave jedan za drugim dva kristala: polarizator i analizator, tada važi

Malusov zakon

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \theta,$$

gde je I_0 intenzitet nepolarizovane svetlosti, pre ulaska u polarizator, θ je ugao pod kojim stoje polarizacione ravni polarizatora i analizatora, a I je intenzitet polarizovane svetlosti posle prolaska kroz oba kristala.

Ako je ugao između njihovih polarizacionih ravni 90° tada svetlost uopšte ne prolazi zato što je $\cos 90^\circ = 0$, pa je $I = 0$. Ako je ugao jednak 45° tada je:



sl. 15.

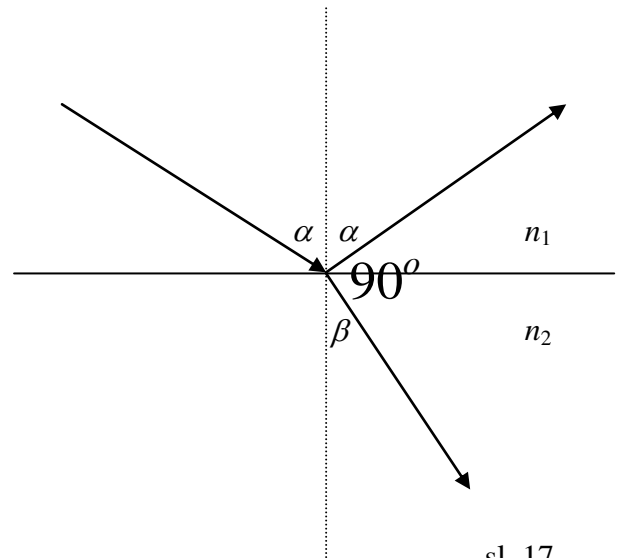
sl. 16.

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = I_0 \cdot \frac{2}{4} = \frac{1}{2} \cdot I_0.$$

Na sl. 16. se vidi da analizator obrće ravan polarizacije svetlosti, a Malusov zakon znači da pri takvom obrtanju ravni, u kojoj je svetlost polarizovana, dolazi do smanjenja njenog intenziteta. Što je ugao obrtanja ravni polarizacije veći (prema 90°) to je intenzitet svetlosti koja prolazi manji, da bi ako je ugao jednak 90° svetlost bila potpuno prigušena ($I = 0$).

Drugi način da se svetlost polarizuje je da se svetlosni zrak pusti na graničnu površinu dve providne sredine (sl. 17.). Pritom se jedan deo svetlosti reflektuje o graničnu površinu, dok drugi deo svetlosti ulazi u drugu sredinu, pri čemu se prelama.

Ako svetlost prelazi iz optički ređe u optički gušću sredinu, npr. iz vazduha u vodu, tada se svetlost prelama ka normali. U ovakvom slučaju i odbijeni i prelomljeni zrak su delimično polarizovani.



sl. 17.

Brusterov zakon: Odbijeni i prelomljeni zrak će biti maksimalno polarizovani ako je ugao između njih 90° . To znači da zbir uglova α i β treba da iznosi takođe 90° (vidi sliku): $\alpha + \beta = 90^\circ$. Ako sada na ovaj slučaj primenimo zakon prelamanja dobijamo:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Zbog: $\alpha + \beta = 90^\circ$ sledi: $\sin \beta = \cos \alpha$, pa je:

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{n_2}{n_1}$$

i dalje:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1},$$

što znači da je:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{n_2}{n_1}.$$

Ako je, kao što je i prethodno rečeno, gornja sredina vazduh, a donja voda, tada su vrednosti apsolutnih indeksa prelamanja: $n_1 = 1.0003$ i $n_2 = 1.3330$, pa je:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1.3330}{1.0003} = \operatorname{arctg} 1.3326 = 53.115^\circ.$$

Prethodni račun pokazuje da će se maksimalna polarizacija svetlosti, pri prelasku iz vazduha u vodu, desiti ako je upadni ugao $\alpha = 53.115^\circ$.

Normalno je da će različiti apsolutni indeksi prelamanja drugih sredina dovesti i do različitih upadnih uglova koji, za te sredine, zadovoljavaju Brusterov zakon.

Postoji jako mnogo različitih primena polarizovane svetlosti.

Primećeno je, na primer, da polarizovana svetlost ubija neke vrste bakterija koje izazivaju kvarenje mleka i mlečnih proizvoda, pa se zato upotrebljava u industriji mleka.

U fotografske aparate se ispred objektiva ugađuju polaroidi. Njihov je zadatak da smanje, ili potpuno uklone odblesak pri slikanju, recimo, vodene površine. Kako je svetlost odbijena o površinu vode delimično polarizovana, polaroid ima ulogu analizatora iz Malusovog zakona. Njegovim okretanjem se može podesiti da njegova polarizaciona ravan bude pod pravim uglom u

odnosu na ravan u kojoj je odbijena svetlost polarizovana i da on spreči prolazak ove svetlosti do objektiva. Njegova prednost u odnosu na klasične filtre je u tome što svu ostalu svetlost propušta do objektiva bez ikakvog prigušenja.

Isti ovakvi polaroidi se mogu ugraditi u vetrobrane automobila da bi smanjili blještanje neba, zato što je i ova svetlost delimično polarizovana pri rasipanju u višim slojevima zemljine atmosfere.

Totalna refleksija

Ova pojava se deševa kada svetlost prelazi iz optički gušće u optički ređu sredinu. Na sl. 18. uzete su dve providne sredine: voda i vazduh. Izvor svetlosti se nalazi u vodi i emituje svetlost naviše ka graničnoj površini. Ako je upadni ugao α_1 mali, tada svetlost prelazi u vazduh, pri čemu se prelama od normale, što znači da je prelomni ugao β_1 veći od upadnog ugla: $\beta_1 > \alpha_1$. Ako povećavamo upadni ugao, doći će do povećanja i prelomnog ugla, u skladu sa zakonom prelamanja svetlosti. Ovakvim povećanjem do vrednosti od 90° prvi će stići prelomni ugao i tada kažemo da je upadni ugao dostigao graničnu vrednost α_g . Ako je, dakle, upadni ugao jednak graničnom, svetlost uopšte i ne prelazi u vazduh, već klizi po graničnoj površini između ove dve sredine (sl. 18. b).

Međutim, ako upadni ugao povećamo tako da bude veći od graničnog ugla (sl. 18. c) tada, po zakonu prelamanja svetlosti, prelomni ugao mora biti veći od 90° , što znači da se svetlost vraća nazad u vodu. Ova pojava se naziva totalna refleksija. Ono što je važno napomenuti je da se u ovom slučaju svetlosni zrak ne vraća nazad u vodu po zakonu prelamanja, već po zakonu odbijanja svetlosti, tj. mora biti: $\alpha_2 = \beta_2$.

Ako zakon prelamanja primenimo na slučaj kada je upadni ugao granični, a prelomni jednak 90° možemo dobiti vrednost graničnog ugla za izabrane dve sredine (voda, vazduh):

$$n_1 \cdot \sin \alpha_g = n_2 \cdot \sin \beta_g$$

$$1.333 \cdot \sin \alpha_g = 1 \cdot \sin 90^\circ$$

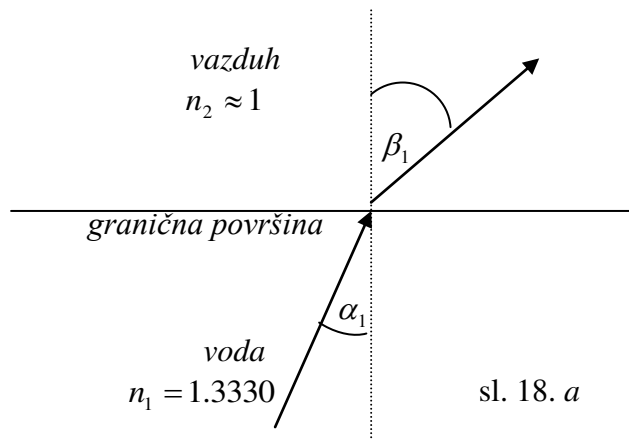
$$\sin \alpha_g = \frac{1}{1.333} = 0.75$$

$$\alpha_g = \arcsin 0.75$$

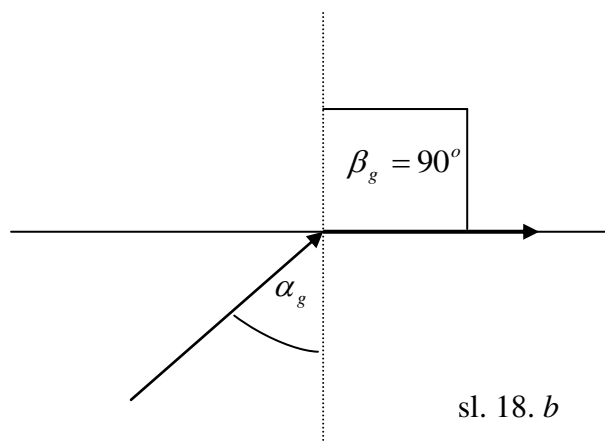
$$\alpha_g = 48.6^\circ$$

U opštem slučaju granični ugao totalne refleksije se može izračunati iz relacije:

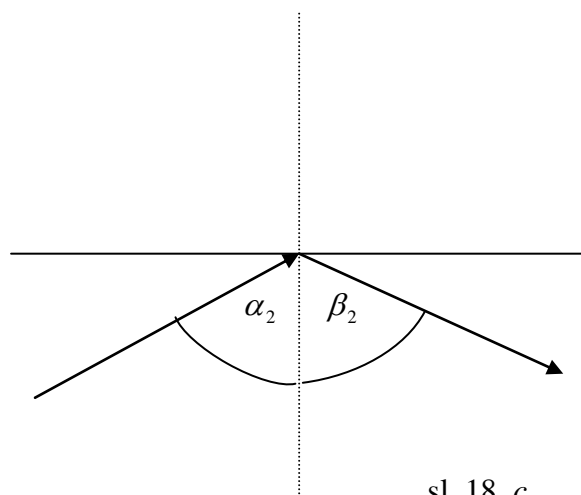
$$\alpha_g = \arcsin \frac{n_2}{n_1} .$$



sl. 18. a



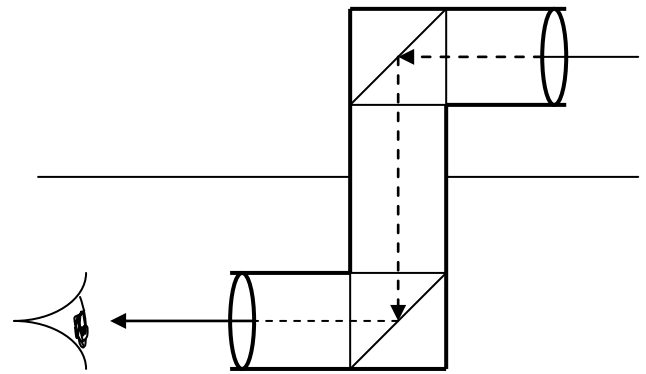
sl. 18. b



sl. 18. c

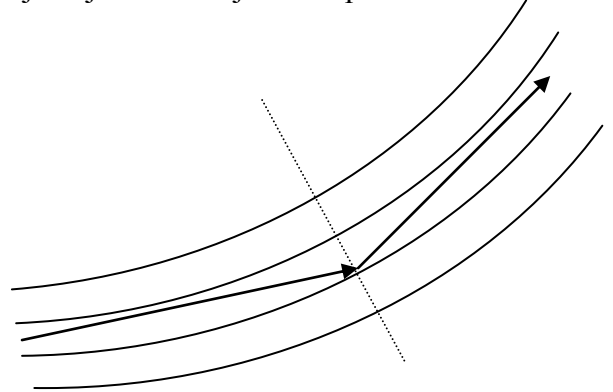
Za staklo – vazduh upadni granični ugao za totalnu refleksiju iznosi: $\alpha_g = 38.68^\circ$.

Jedna od primena totalne refleksije je u optičkim uređajima kao što su periskop ili dvogled. Na sl. 19. prikazana je primena kod periskopa. Staklene prizme sa uglovima 45° , 45° i 90° služe da menjaju optički put zraka svetlosti. Kada zrak svetlosti stiže na površinu prizme pod uglom od 90° on tada prolazi kroz graničnu površinu pravolinijski. Međutim, kada zrak putujući kroz unutrašnjost prizme stigne na graničnu površinu sa vazduhom upadni ugao iznosi 45° , a to je vrednost veća od graničnog ugla za totalnu refleksiju na granici staklo – vazduh. Zato zrak totalno reflektuje kako je to i prikazano na slici, a posmatrač u podmornici može da posmatra događaje koji se dešavaju iznad površine vode.



sl. 19.

Značajna je i primena totalne refleksije u optičkim kablovima (kojima je moguće umrežiti više računara). Tada se prenos informacija kroz kabl vrši laserskim zrakom. Međutim, kada je kabl savijen, laserski zrak ne napušta kabl zato što ga sprečava totalna refleksija. Ona se dešava zato što je kabl napravljen od dve vrste stakla (sl. 20.). Unutrašnji sloj stakla je optički gušći, tj. napravljen je od stakla sa većim apsolutnim indeksom prelamanja, dok je spoljašnji sloj napravljen od stakla sa manjim apsolutnim indeksom prelamanja, dakle ovo staklo je optički reda sredina. Opisana pojava je poznata kao Kerov efekat, po engleskom fizičaru koji ju je otkrio krajem XIX veka.



sl. 20.

Disperzija svetlosti

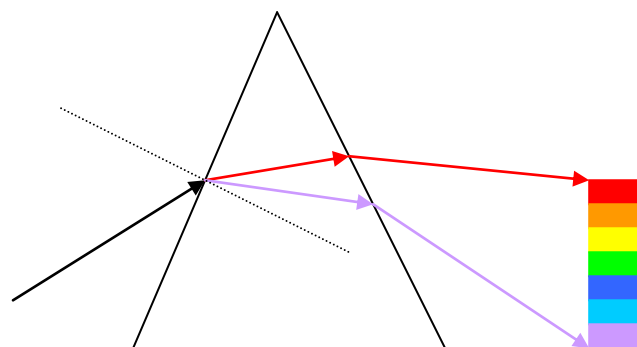
Monohromatske (jednobojne) svetlosti različitih talasnih dužina (dakle i različitih boja) će pri prelasku iz vakuuma u neku providnu sredinu imati različite brzine kretanja kroz nju. To znači da ta sredina ima različit apsolutni indeks prelamanja za svaku od ovih svetlosti.

Disperzija svetlosti je zavisnost apsolutnog indeksa prelamanja date sredine od kružne frekvencije ω svetlosti koja kroz tu sredinu prolazi:

$$n = f(\omega).$$

Ovo znači da će zbog različitih brzina monohromatske svetlosti različitih boja imati i različite prelomne uglove pri prelasku iz vakuuma u datu providnu sredinu, ali i različite uglove prelamanja pri izlasku iz te sredine nazad u vakuum.

Pojavu disperzije je najbolje posmatrati pri prolasku bele svetlosti kroz trostranu staklenu prizmu. Bela svetlost je kompleksna, tj. sastoji se od svih svetlosnih boja. Crvena boja ima najveću brzinu pri prolasku kroz staklo, dok je ljubičasta svetlost najsporija. Zato je prelom-



sl. 21.

ni ugao crvene svetlosti najveći, dok je prelomni ugao ljubičaste svetlosti najmanji. Zbog toga pri prolasku kroz prizmu najviše skrene ljubičasta, a najmanje crvena svetlost. To dovodi do razlaganja kompleksne bele svetlosti na osnovne boje, što je prikazano na sl. 21.

Razlaganje bele svetlosti na spektar boja je uzrok stvaranja duge. Bela sunčeva svetlost prolazeći kroz kapi kiše razlaže se na boje koje vidimo na zaklonu od oblaka. Jasno je da nebo istovremeno treba da bude i vedro i oblačno. Ona polovina neba na kojoj se nalazi Sunce treba da bude vedra, dok druga polovina neba treba da bude oblačna i da u tom delu pada kiša. Zato se ova pojava obično dešava neposredno po prestanku kiše kada počne da se razvedrava.

Jedna od najvažnijih primena razlaganja svetlosti na spektar boja (disperzijom) je dobijanje emisionih i apsorpcionih spektara elemenata.

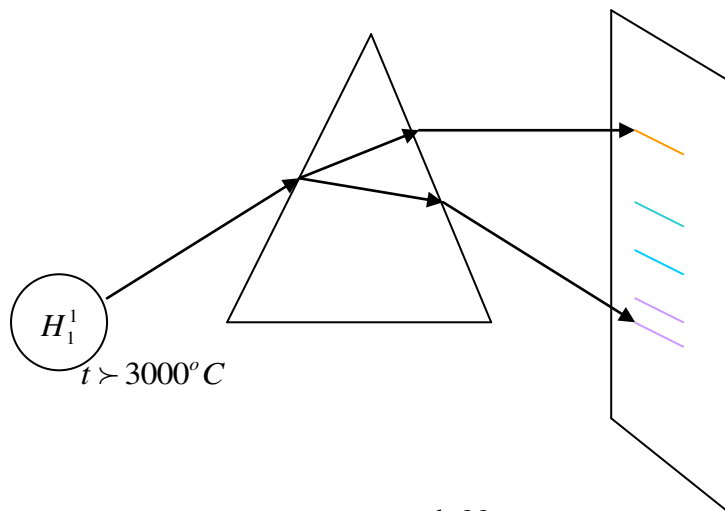
Emisioni spektar elemenata

Ako dati element – recimo vodonik – zagrejemo do temperature belog usijanja, tada će on emitovati svetlost. Potrebna temperatura se može postići vrlo brzo pomoću lasera i treba biti veća od $3000^{\circ}C$.

Svetlost koju on emituje treba propustiti kroz staklenu prizmu i na zaklonu će se, kao posledica disperzije pojaviti spektar emitovane svetlosti. Međutim, ovaj spektar neće sadržati sve boje, već će se pojaviti nekoliko svetlih linija karakterističnih za dati element. Kod vodonika to će biti

5 karakterističnih linija talasnih dužina: 654.54 nm – narandžasta linija, 484.84 nm – zeleno-plava linija, 432.90 nm – plavo-modra linija, 409.09 nm i 395.95 nm – obe ove linije su ljubičaste.

Dobijeni spektar se naziva emisioni zato što nastaje emisijom svetlosti iz usijanog elementa, linijski zato što se sastoji od raznobojnih svetlih linija i karakteristični jer su dobijene linije karakteristične za dati element i on se po njima razlikuje od svih ostalih elemenata.



sl. 22.

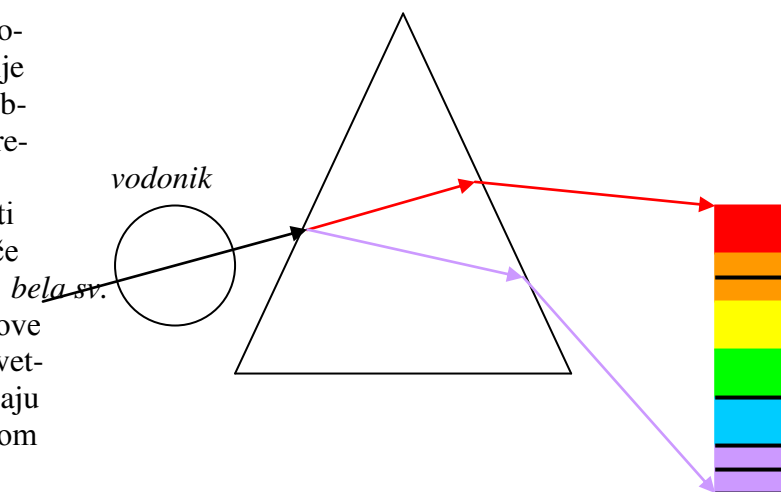
Apsorpcioni spektar

Ovaj spektar nastaje kada belu svetlost, koja ima neprekidni spektar sastavljen od svih boja, propustimo kroz dati element koji nije usijan nego se recimo nalazi na sobnoj temperaturi. Uzmimo, radi poređenja, da je to opet vodonik.

Vodonik će iz bele svetlosti apsorbovati baš one boje koje inače emituje kada je usijan.

Zbog toga će se u spektru ove svetlosti pojaviti pet tamnih, neosvetljenih, tj. crnih linija koje se nazivaju Fraunhoferove linije – po nemačkom optičaru koji ih je otkrio.

Vodonikove Fraunhoferove linije su zato tačno na onim mestima



sl. 23.

gde se inače nalaze emisione linije

usijanog vodonika. Zbog toga se može reći da se emisioni i apsorpcioni spektar istog elementa odnose jedan prema drugom kao pozitiv i negativ u fotografiji.

Emisioni i apsorpcioni spektri elemenata imaju značajnu primenu u analizi sastava različitih materijala, kako u naučno – istraživačkim laboratorijama, tako i u industriji. Ono što je najvažnije pomoću ovih spektara astronomi su odredili hemijski sastav našeg Sunca, ali i drugih udaljenih zvezda.

Rasipanje svetlosti

Svetlosni zrak se može posmatrati kao mlaz fotona (zrnaca energije) koji se kreću brzinom svetlosti i pritom osciluju u svim mogućim pravcima u odnosu na pravac svog kretanja. Zbog toga se svetlosni zrak najbrže kreće kroz vakuum, jer nema čestica karakterističnih za materijalne sredine koje bi ometale njegovo prostiranje.

Jedan od načina kako inače providna materijalna sredina ometa prostiranje svetlosti je i sudaranje fotona sa molekulima ili drugim sitnim česticama prisutnim u toj sredini. Ako je ta sredina vazduh, tada pored molekula vazduha u njoj ima i molekula vodene pare, čestica prašine, dima itd. Pri sudaru sa njima pojedinačni fotoni skreću sa pravolinijske putanje zraka, a ova pojava se sasvim prikladno naziva – rasipanje svetlosti.

Dakle jedan deo svetlosnog zraka, koga čine oni fotoni koji nisu doživeli sudare, nastavlja da se kreće pravolinijski, dok fotoni koji su se sudarili sa mikro preprekama skreću u stranu – u svim pravcima – i čine rasutu ili difuznu svetlost.

Rejlejev zakon rasipanja svetlosti glasi: intenzitet rasute svetlosti, u datoj sredini, obrnuto je srazmeran četvrtom stepenu njene talasne dužine. Ovo znači da se svetlosti različitih talasnih dužina (boja) ne rasipaju podjednako pri prolasku kroz istu materijalnu sredinu. Najviše se rasipa ljubičasta, dok se najmanje rasipa crvena svetlost. Kako je talasna dužina ljubičaste svetlosti skoro dva puta manja od talasne dužine crvene svetlosti – po Rejlejevom zakonu – ljubičasta svetlost se rasipa oko četrnaest puta više nego crvena:

$$I_{lj} = \frac{k}{\lambda_{lj}^4} \quad \text{i} \quad I_c = \frac{k}{\lambda_c^4}$$

sledi:

$$\frac{I_{lj}}{I_c} = \frac{\frac{k}{\lambda_{lj}^4}}{\frac{k}{\lambda_c^4}} = \frac{\lambda_c^4}{\lambda_{lj}^4} = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{lj}} \right)^4 = \left(\frac{750nm}{390nm} \right)^4 = (1.923)^4 = 13.677.$$

Rasipanje svetlosti je uzrok mnogih prirodnih pojava i daje odgovore na neka pitanja kao što su:

- Zašto je nebo modro-plavo ?
- Zašto je more modro-plavo i da li je ono baš uvek takvo ?
- Zašto nije mrak kada je oblačno, tj. kada je Sunce potpuno zaklonjeno oblacima ?
- Zašto je Sunce na zalasku crveno ?
- Zašto za farove za maglu koristimo žuta svetla ? itd.

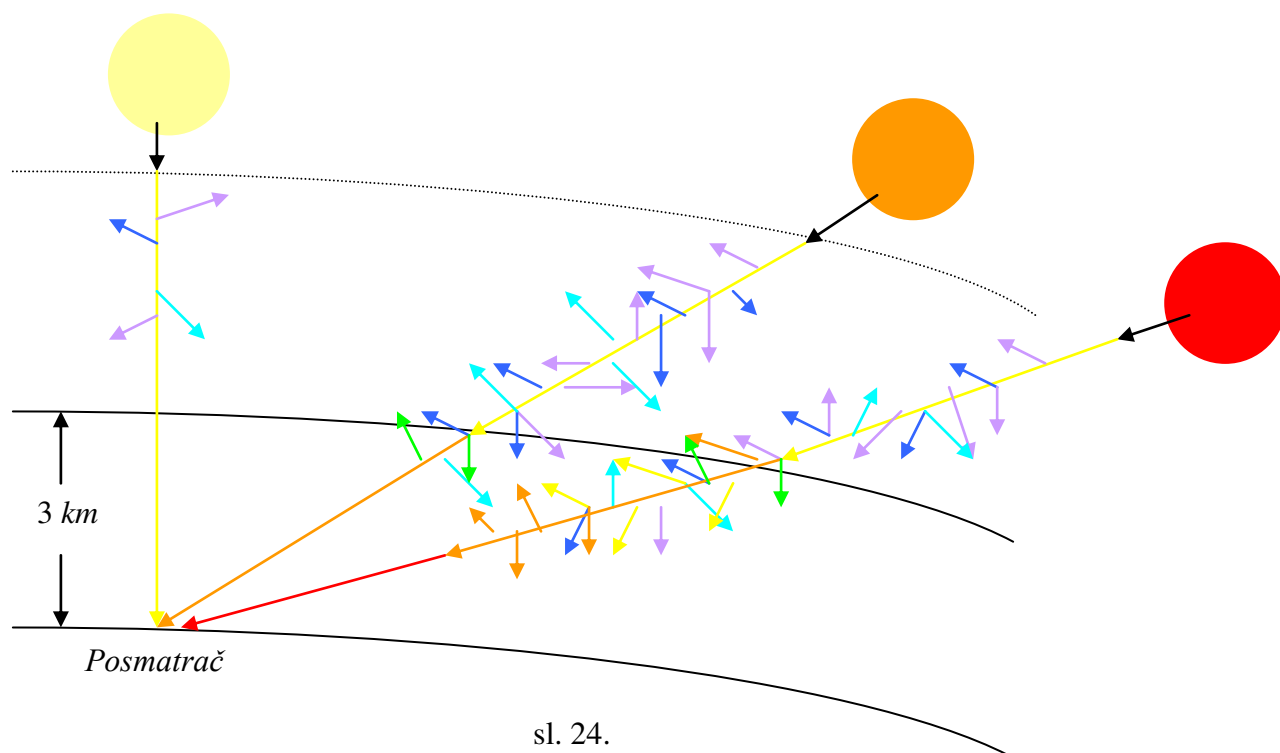
- Pri ulasku u zemljinu atmosferu kompleksna bela sunčeva svetlost se rasipa na molekulima atmosfere, pri čemu se – u skladu sa Rejlejevim zakonom rasipanja – najviše raspu: ljubičasta, modra i plava svetlost. Rasuti fotoni ove tri svetlosti se kreću haotično pri čemu jedan njihov deo stiže do zemljine površine i do naših očiju što je uzrok da vidimo da je nebo modro. Dodatna posledica je da sunčeva svetlost – koja bez rasipanja stigne direktno do naših očiju – ne sadrži rasute fotone kratkotalasnih boja. Zato u ovoj svetlosti ima više fotona crvene, narandžaste, žute i zelene svetlosti nego fotona plave, modre i ljubičaste svetlosti. Zbog toga Sunčeva svetlost nije idealno bela već je svetlo-žuta, što je uostalom i razlog da samo Sunce vidimo kao svetlo-žuto.

- Boja mora je modra kao i boja neba zato što more kao veliko ogledalo reflektuje rasute fotone plave, modre i ljubičaste svetlosti kada stignu na njegovu površinu. More ne mora biti ove boje. Ako je dan oblačan tada je more sivo kao i oblaci iznad njega. Boja mora može zavisiti i od biljaka koje žive u njemu. Prisustvo npr. velikih količina crvenih korala na njegovom dnu može izazvati da boja vode bude crvenkasta.

- Kada je nebo oblačno, pa zbog toga ne vidimo Sunce, svi fotoni koji uđu u sloj oblaka se raspu na molekulima vodene pare i prašine koju oblaci uvek sadrže. Pošto ni jedan od fotona ne stiže direktno sa površine Sunca do naših očiju to ima za posledicu da ne vidimo Sunce. Ali rasuti fotoni se kreću u svim pravcima, pa izvestan broj njih stiže do zemljine površine pa i do naših očiju. Ovi fotoni osvetljavaju zemljinu površinu ispod oblaka, pa zato ispod oblaka nije mrak. Iz istog razloga unutrašnjost stanova je osvetljena iako sunčeva svetlost ne stiže u njih direktno, a ovakva difuzna svetlost je razlog da u senkama nije potpuni mrak.

- Da bi u potpunosti razumeli pojavu promene boje Sunca kada pred kraj dana zalazi na zapadu treba razmotriti sledeću situaciju. Uzmimo da je noć i magla i da napolju postavimo jedan sto na kome se nalazi sedam baterijskih lampi koje emituju sedam boja iz spektra svetlosti: crvenu, narandžastu, žutu, zelenu, plavu, modru i ljubičastu i da su sve ove svetlosti istog intenziteta. Tada stanemo neposredno ispred stola i vidimo svih sedam lampi. Kako se ljubičasti fotoni najviše rasipaju, ako krenemo unazad udaljavajući se od stola prva lampa koju prestanemo da vidimo je ljubičasta. Naime pojedinačnu lampu vidimo sve dok iz nje do naših očiju stižu fotoni. Sledeća je modra itd. sve dok poslednju, na najvećem rastojanju od stola, ne budemo videli samo crvenu lampu – zato što se crveni fotoni najmanje rasipaju.

Isto je i sa Suncem koje emituje sve boje svetlosti, kao da je na njegovoj površini upaljeno sedam raznobojnih lampi. Danju je Sunce visoko na nebu pa je put zraka kroz zemljinu atmosferu kratak, a naročito je kratak put kroz najniži sloj atmosfere (do 3 km) iznad površine u kome ima najviše prašine, dima i magle i u kome je zbog toga rasipanje najintenzivnije. Zato je rasipanje svetlosti u podne slabo, pa mešavinu boja, koje direktno sa Sunca stižu do nas, vidimo kao svetlo-žutu, što je već ranije objašnjeno. Predveče Sunce je nisko na nebu pa zbog toga zraci sa njegove površine imaju duži put kroz donji sloj vazduha, pa je rasipanje svetlosti veće nego u podne. Tada su, zbog Rejlejevog zakona, skoro potpuno rasute ljubičasta, modra i plava svetlost, a delimično i zelena. Ostatak fotona koji još uvek stiže do nas je uglavnom žute, narandžaste i crvene boje, pa zbog toga vidimo da je Sunce narandžasto. Pred sam zalazak sunčeva svetlost ima najduži put kroz najniži sloj atmosfere pa je zbog toga rasipanje maksimalno. Tačnije, na putu do nas raspu se sve boje osim crvene, pa je zato Sunce na zalasku crveno.



sl. 24.

Međutim, ujutro Sunce je retko kada tako crveno kao što je uveče na zalasku. Razlog je što je uveče u vazduhu mnogo više prašine i dima, koji su posledica naših dnevnih aktivnosti. Ujutro prašine i dima ima mnogo manje jer smo preko noći spavali pa nismo bili u prilici da zagađujemo atmosferu.

- Poziciona svetla, kao i stop svetla na zadnjoj strani automobila su crvena zato da bi se videla sa što veće udaljenosti u uslovima slabe vidljivosti kao što su noć i magla. Uostalom to je razlog da i svetlo na semaforu koje obavezuje vozače da se zaustave bude crvene boje.

Ali svetla za maglu su žuta što zahteva posebno objašnjenje. Kada su u pitanju farovi koji treba da osvetle put ispred vozila u uslovima magle, postoje dva zahteva. Jedan je da svetlost iz ovih farova prodre što dalje kroz maglu, a to znači da se što manje rasipa. Za to znamo da je najbolja crvena svetlost. Drugi zahtev je da ta svetlost što bolje osvetli put, a za to je najbolja ljubičasta svetlost. Ako ne verujete probajte da čitate na svetlosti iz crvene ili narandžaste sijalice. Tako dolazi do sukoba ova dva zahteva i optimalno srednje rešenje je žuta svetlost koja prilično dobro osvetljava put, a i ne rasipa se u velikoj meri.