

INTERFERENCIJA SVJETLOSTI

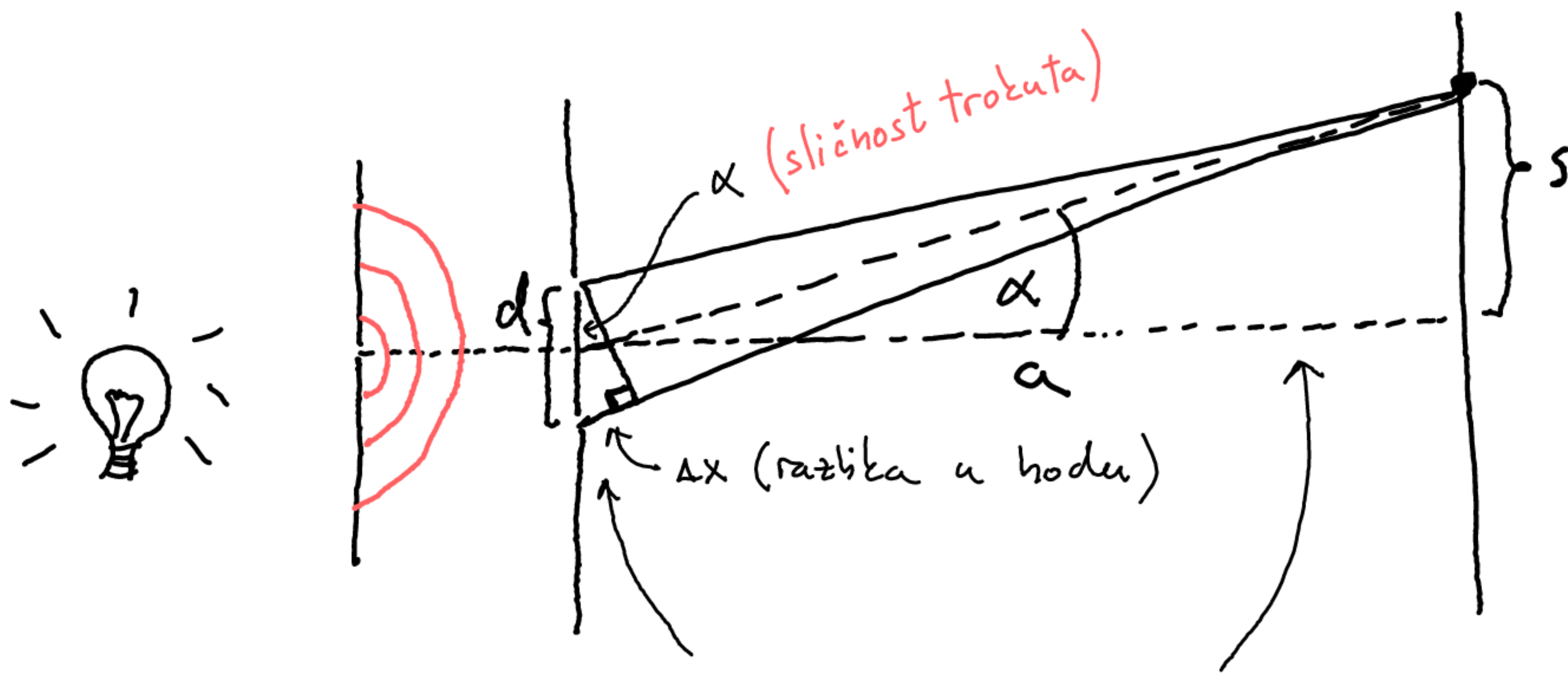
↳ potrebno: 2 KOHERENTNA (točkasta) vala / izvora

↳ konstantna razlika u fazi (u vremenu)

→ izvori svjetlosti inače, zbog prirode nastanka svjetlosti (koju ćemo naučiti kasnije) stvaraju puno valova svakakvih valnih dužina i početnih faza u različitim trenucima

→ za interferenciju je potrebno da svi valovi iste valne dužine imaju istu (početnu) fazu

→ Youngov eksperiment (~1803)



MALI TROKUT:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta x}{d}$$

VELIKI TROKUT:

$$\tan(\alpha) = \frac{s}{a}$$

Za $a \gg s$ vrijedi $\frac{s}{a} \ll 1$, dakle $\alpha \approx 0$ (mali kut),

$$\text{pa vrijedi: } \left. \begin{array}{l} \sin(\alpha) \approx \alpha \\ \cos(\alpha) \approx 1 \end{array} \right\} \underline{\underline{\text{tg } \alpha \approx \sin(\alpha) \approx \alpha !}}$$

Na primjer za $a \approx 1\text{m}$
 $s \approx 1\text{cm}$ $\left\{ \frac{s}{a} = \text{tg}(\alpha) = 10^{-2} = 0.01 \right.$

$$\Rightarrow \alpha = \text{tg}^{-1}(0.01) = 0.0099997 \text{ (0.003 \%)}$$

$$\Rightarrow \sin(\alpha) = 0.0099995 \text{ (0.005 \%)}$$

$$\Rightarrow \frac{s}{a} \approx \frac{\Delta x}{d} \Rightarrow \boxed{s = \Delta x \cdot \frac{a}{d}}$$

pogreška koju ovime
čihimo/unosimo je
toliko mala da je
zanemariva

KONSTRUKTIVNA INTERFERENCIJA (MAKSIMUMI)

$$\Delta x = d \cdot \sin(\alpha_{\max}) = \underline{k \cdot \lambda} \Rightarrow \boxed{s_{k,\max} = k \cdot \frac{\lambda \cdot a}{d}}$$

$\hookrightarrow k = 0, 1, 2, 3, \dots$

DESTRUKTIVNA INTERFERENCIJA (MINIMUMI)

$$\Delta x = d \cdot \sin(\alpha_{\min}) = \underline{(2k-1) \frac{\lambda}{2}} \Rightarrow \boxed{s_{k,\min} = \frac{(2k-1)}{2} \frac{\lambda \cdot a}{d}}$$

$\hookrightarrow k = 1, 2, 3, \dots$

Kad je Young to napravio dobio je pruge šarene
kao duga $\Rightarrow$ „obična“ svjetlost sastoji se od mnogih (svih!)
valnih dužina $\left[\begin{array}{l} \text{različiti izvori u} \Rightarrow \text{SPEKTRI} \\ \text{različitim omjerima (kasnije)} \end{array} \right]$

Na ovaj način može se odrediti valna dužina
pojedine „boje“ svjetlosti ...

tanke filmovi (ulje, sapunica ...) i Newtonovi kolobari

$\rightarrow$ drugačija geometrija, ista „fizika“ (istražiti!)

$\rightarrow$ filmovi/slojevi moraju biti „tanki“ zbog ...

$\Rightarrow$ KOHERENCIE

→ OPTIČKA REŠETKA (Fraunhofer - godina ?, priča ? 7000)

↳ umjesto 2, jako puno ekvidistantnih pukotina

[sve ostalo je „isto“
kao kod Youngovog
pokusaa]

$$d = \frac{L}{N} \rightarrow \text{konstanta}$$

REŠETKE !

npr. $d = \frac{1 \text{ mm}}{100}$ (100 „pukotina“
po milimetru)

skica u kužici

→ geometrijski uvjeti su ISTI (za maksimume,
za minimume NE !)

ali INTENZITET i OŠTRINA

pruga (maksimuma) su PUNO VEĆI (jer je
interferencija od puno izvora na istom mjestu)

→ jako koristan, najčešći (glavni) instrument/princip
valne optike

šareni odbojesak s CD-om, hologrami, šarene životinje...

↳ ista ili vrlo slična „fizika“ (istražiti)

OGIB SVJETLOSTI (DIFFRACTION)

↳ interferencija, kroz jednu (širu) pukotinu ili oko neke prepreke, po HUYGENSOVOM PRINCIPU!

(dosta kompliciranije za dobiti točne odgovore, čak i samo geometrijski, nego za „točkaste“ izvore)

- PRIMER 1 - „široka“ pukotina (vidi sliku u knjizi)

→ podjela pukotine na pola i sparivanje točaka/izvora udaljenih za $\frac{d}{2} \Rightarrow$ DESTRUKTIVNA interferencija



za $d \cdot \sin(\alpha_{\min}) = k \cdot \lambda$

(suprotno od Youngovog pokusa/rešetke gdje je to uvjet maksimuma!)

→ ta logika vrijedi samo

[RAZMISLITI,
PROBATI
SAM]

za neparne k , za parne k mora se pukotina podijeliti na četvrtine, osmine, šesnaestine...

→ logika za maksimume ... ??? (nema „lagalog“ objašnjenja)

→ intenzitet maksimuma PUNO manji, središnja točka/linija PUNO svjetlija od svega ostalog

$\Rightarrow$ puno slabiji fenomen, teži za opaziti

- PRIMER 2 - okrugla „prepreka“ (sjena iza kuglice)

→ „očekivani“ rezultat - okrugla sjena na zidu

→ stvarni rezultat (ako je kuglica dovoljno mala + još neki uvjeti - Google „Fresnel number“) - difrakcijski uzorak (koncentrične svijetle i tamne kružnice) +

SVIJETLA TOČKA U SREDINI ?!!

(ARAGO ili POISSONOVA ili FRESNELOVA TOČKA)

- EXPERIMENT - debljina vlasi kose

↳ vlas pred laser poznate λ

→ uvjeti minimuma isti kao za pukotinu...

→ napraviti doma samostalno

→ malo istražiti (Google, YT, ...)

→ barem 5 mjerenja (razbije udaljenosti)

→ statistička obrada

→ referat / izvještaj

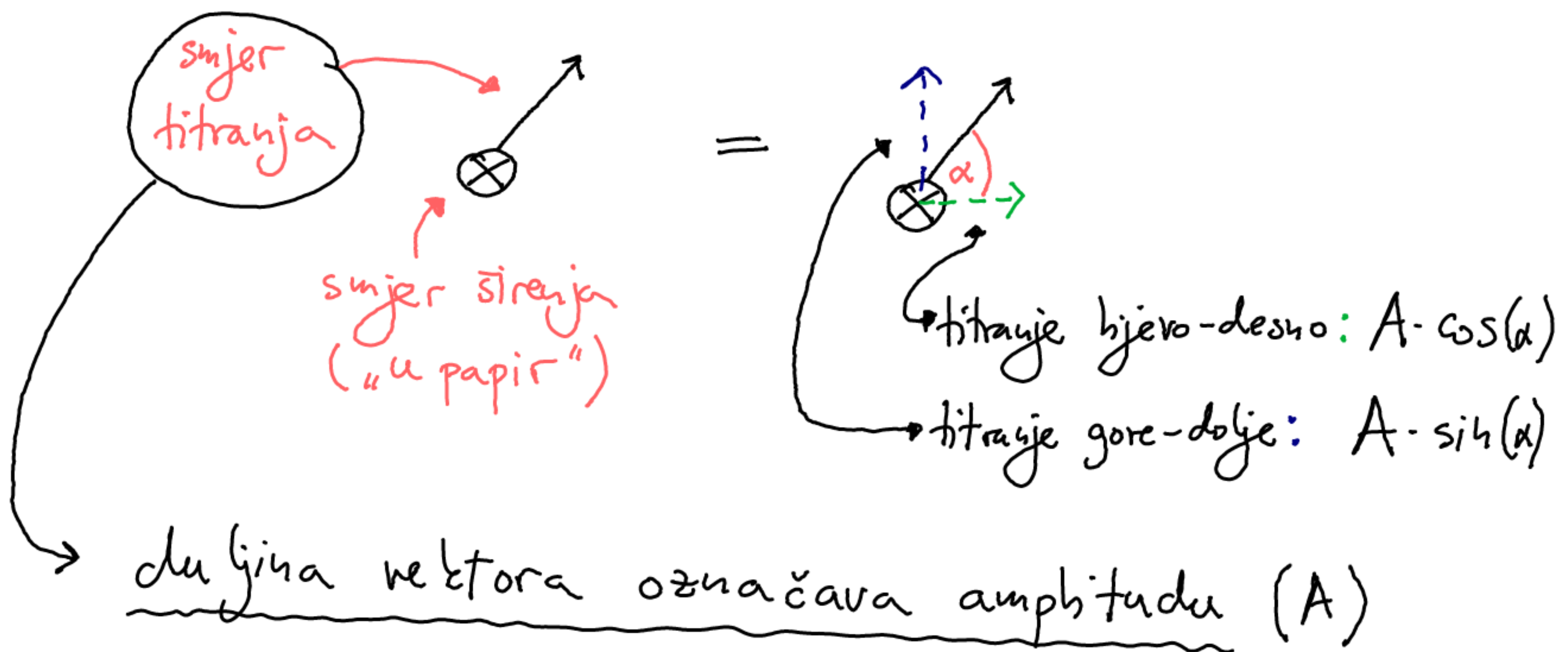
POLARIZACIJA SVJETLOSTI (POLARISATION)

→ posljedica činjenice, odnosno dokaz da je
svjetlost TRANSVERZALNI VAL (titranje sredstva se
dogadja okomito na
smjer širenja vala)

→ nije longitudinalni $\Rightarrow$ sredstvo NE MOŽE titrati u
smjeru širenja - uopće

→ može titrati u BILIKOM smjeru okomitom
na smjer širenja $\Rightarrow$ BESKONAČNO smjerova (ravniha)

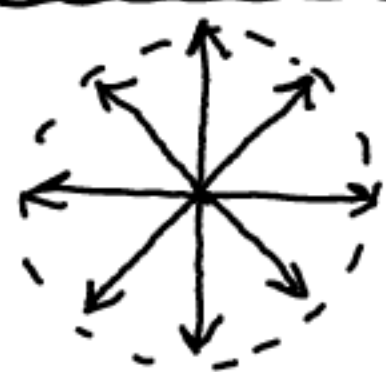
$\Rightarrow$ mogućnost rastava smjera titranja na
okomite komponente (kao vektori)!



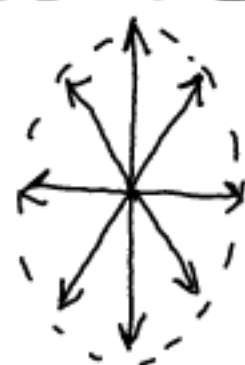
(to sve vrijedi za 1 val)

→ SVJETLOST = PUNO VALOVA

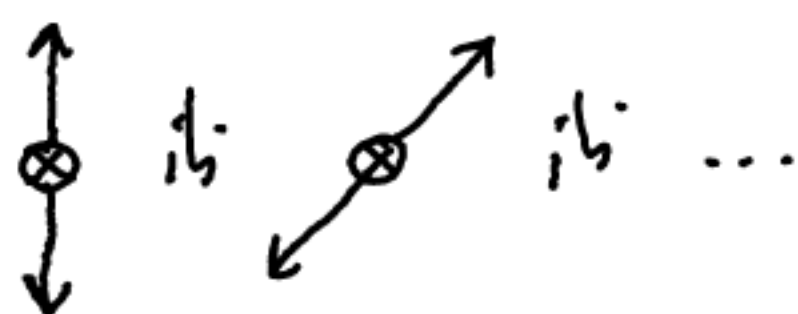
→ ne polarizirana - (statistički) jednako valova titra u svim smjerovima



→ djelomično polarizirana - više valova titra u jednom nego u ostalim smjerovima



→ linearno polarizirana - svi valovi titraju u (približno) istom smjeru



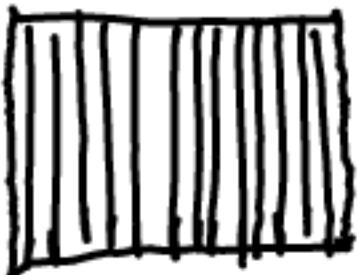
- 1) prolaskom kroz polarizator
- 2) refleksijom od površina
- 3) raspršenjem na malim česticama
- 4) prolaskom/lomom kroz neke kristale

→ cirkularno polarizirana ...

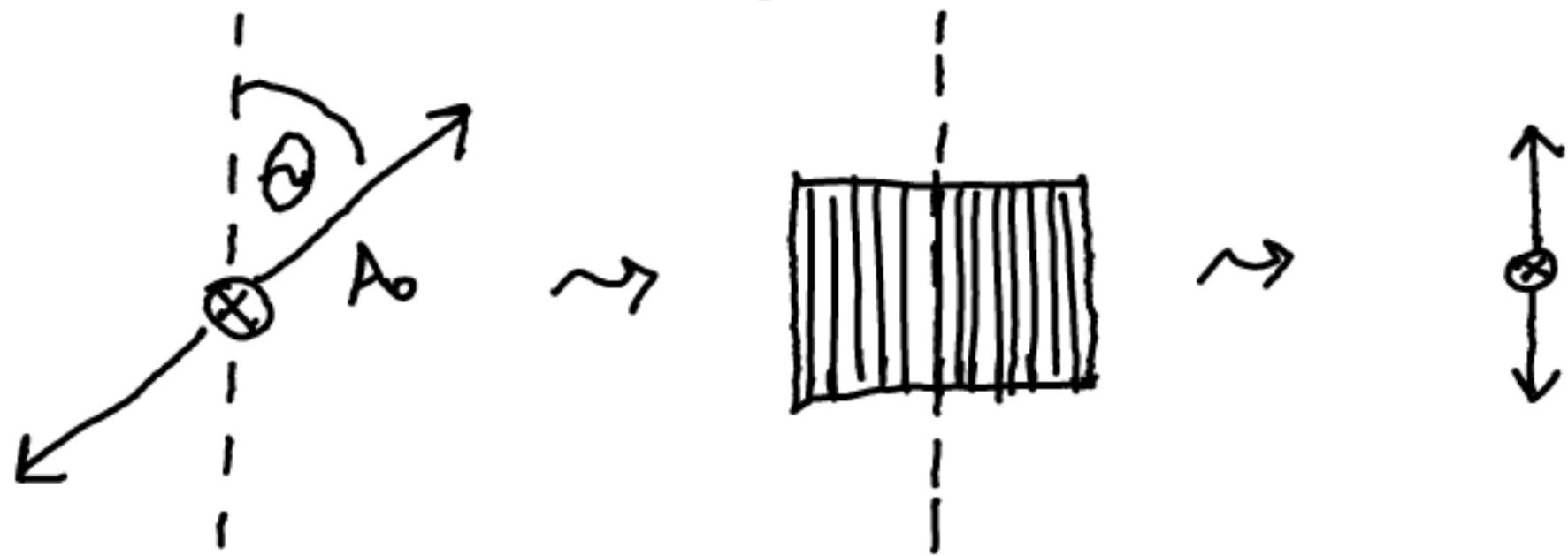
→ INTENZITET SVJETLOSTI $\left(I = \frac{\text{snaga}}{\text{površina}} = \frac{\text{energija}}{\text{vrijeme} \cdot \text{površina}} \right)$

- ↳ proporcionalan kvadratu amplitude ($I \sim A^2$)
- ↳ to je koliko "sjetlo" nešto vidimo

→ POLARIZATOR

↳ uređaj / alat / tvar koja propušta svjetlost samo određene polarizacije; „folija“ koja je kao „rešetka“ — 

1) polarizirana svjetlost kroz (2.) polarizator (ANALIZATOR):



$$A = A_0 \cdot \cos(\theta)$$

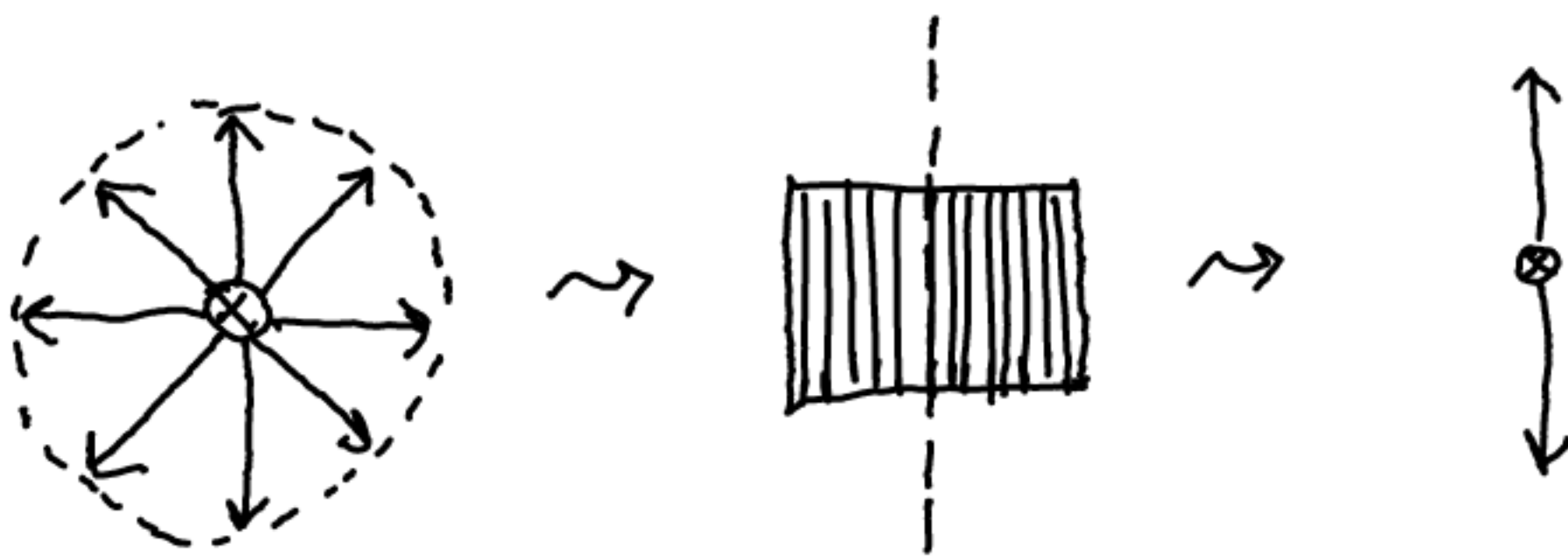
⇓

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta) \quad !$$

MALUSOV ZAKON

θ - kut između osi ulazne polarizacije i osi analizatora

2) nepolarizirana svjetlost kroz polarizator:



$$I = \int_0^{\pi} I_0 \cdot \cos^2(\theta) \frac{d\theta}{\pi}$$

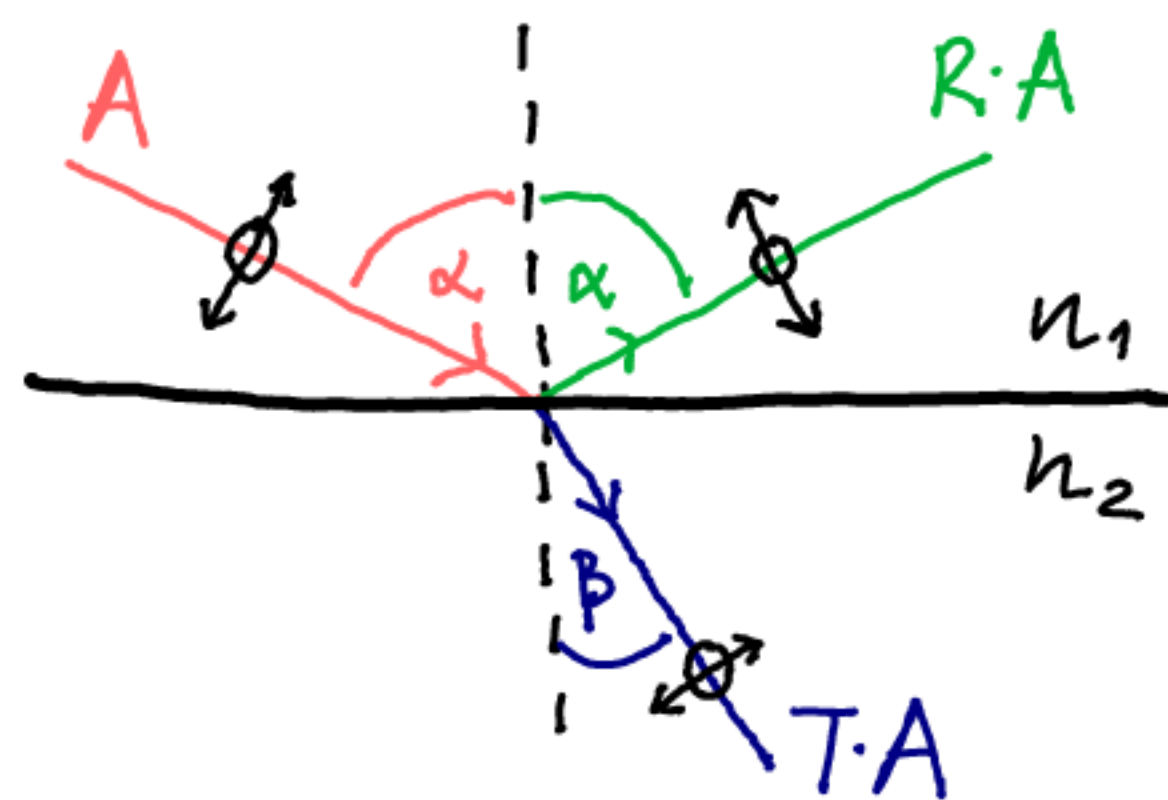
(„zbroj“ udjela po svim kutovima)

$$\Rightarrow I = \frac{1}{2} \cdot I_0 \quad !$$

(gubi se pola svjetlosti,
SVIH valnih dužina!)

→ POLARIZACIJA REFLEKSIJOM (Brewster)

→ općenito vrijedi da se jedan dio svjetlosti reflektira (R), a ostatak da se transmitira ($T = 1 - R$)



→ koliko će se reflektirati, a koliko transmitirati ovisi o n_1 i n_2 , ali i o smjeru polarizacije upadnog vala, koju se može rastaviti na komponentu paralelnu s površinom ($\parallel$); komponentu okomitu na tu paralelnu s površinom ($\perp$).

⇒ REFLEKTIRANA svjetlost ima više $\parallel$ komponente →

→ djelomično ili potpuno POLARIZIRANA u $\parallel$ smjeru

→ kada su reflektirana i transmitirana zračka pod pravim kutem (90°), reflektirana svjetlost je POTPUNO POLARIZIRANA.

⇒ BREWSTEROV ZAKON ; Brewsterov kut (α_B)

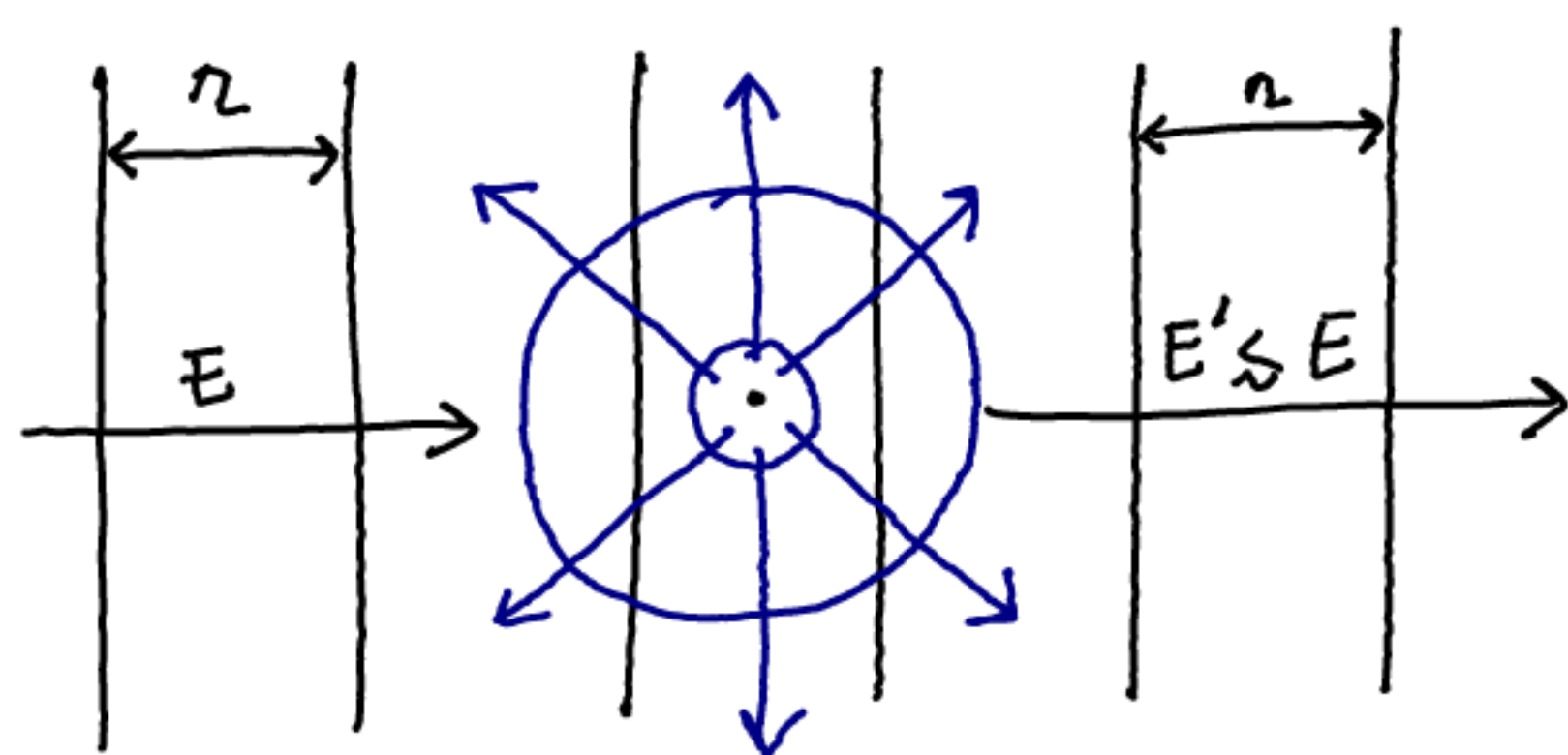
⇒ vrijedi: $\alpha_B + \beta = 90^\circ$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\alpha_B)}{\sin(\beta)} = \dots = \underline{\underline{\tan(\alpha_B)}}$$

→ koristi se za utvrđivanje indeksa loma sredstva

RASPRŠENJE SVJETLOSTI (SCATTERING)

→ ako svjetlost (ili bilo koji val, općenito) naiđe na prepreku koja je (puno) manja od valne dužine onda se na njoj djelomično rasprši, to znači da izgubi (maleni) dio energije i da nastane novi val čiji izvor/središte je ta prepreka...



⇒ RAYLEIGHEVO raspršenje

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

↑ intenzitet raspršene svj. ↑ valna dužina raspršene svj.

→ raspršena svjetlost je polarizirana (ovisno o smjeru)

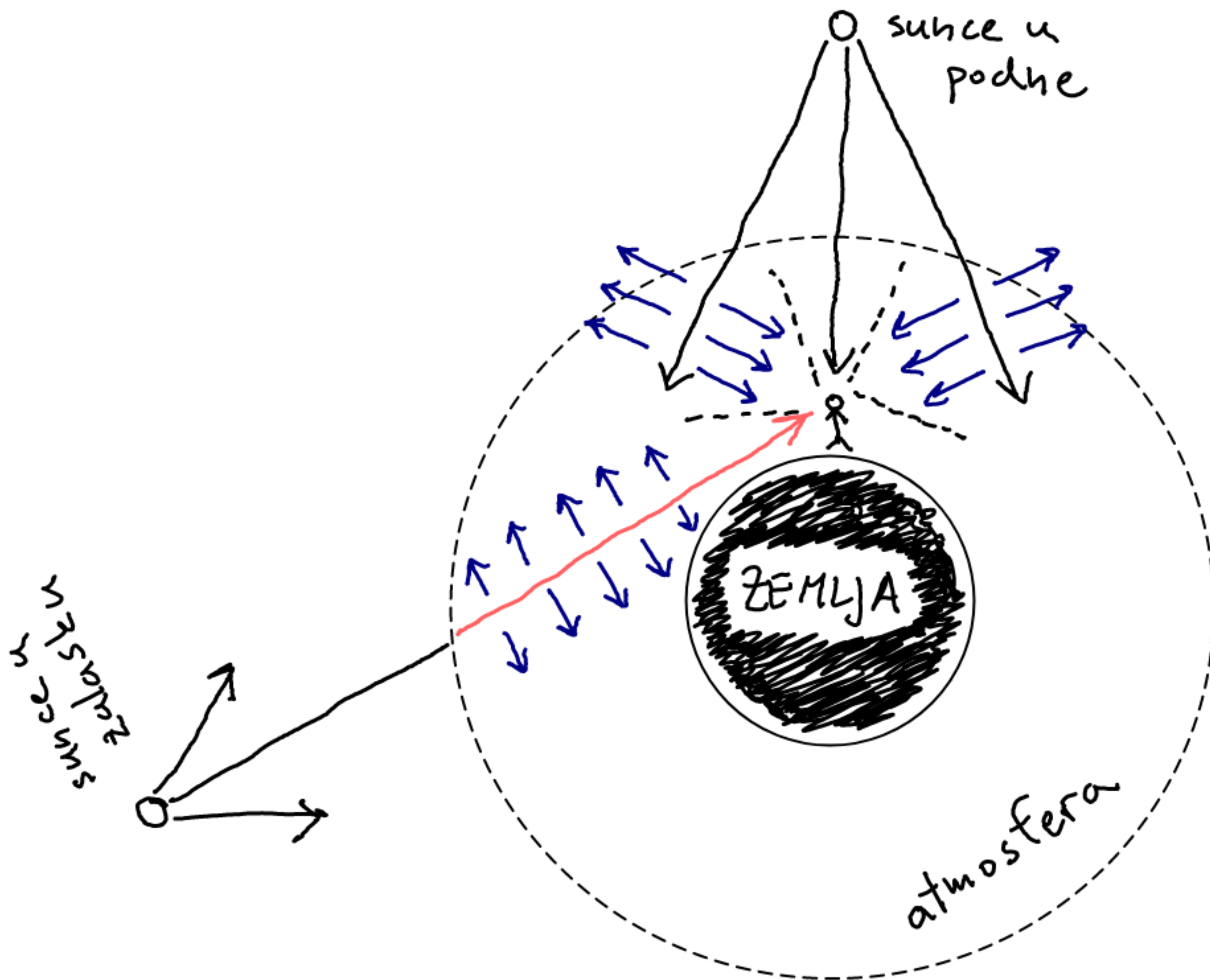
PRIMJER: sunčeva svjetlost koja pada na zemlju

→ prepreka: čestice (molekule) atmosfere/zraka

$$[\lambda \sim 500 \text{ nm}, r_{\text{mol}} \sim 1 \text{ nm} \Rightarrow \underline{\text{vijedi: } \frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1}]$$

→ zbog $1/\lambda^4$ ovisnosti ~ 16 puta više plave svjetlosti ($\sim 400 \text{ nm}$) se rasprši nego crvene ($\sim 800 \text{ nm}$)

→ daleko raspršena svjetlost je puno „plavija“ nego
li je crvena (ljubičasta se rasprši još više, ali je ima
puno manje ... ukupni efekt po svim valnim dužinama je
svjetlo-plava boja → boja (dnevnog) NEBA)



⇒ dnevno nebo je PLAVO jer gledamo u
RASPRŠENU svjetlost (osim ako gledamo ravno u
sunce → preveliki intenzitet, opasno)

⇒ zalasci sunca su CRVENI jer gledamo u
NERASPRŠENU svjetlost („ravno“ u sunce →
manji intenzitet jer puno duži put kroz atm.)

STVARNA PRIRODA SVJETLOSTI (što titra i zašto ??)

→ ELEKTROMAGNETSKI VALOVI !

↳ titraju električno ($\vec{E}$) i magnetsko ($\vec{B}$) polje,
medusobno OKOMITI i U FAZI

→ ELEKTROMAGNETIZAM (povlačanje):

(MONOPOLI)

1) Coulombov zakon ($\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r}$) → „električni naboji su izvori i pokori E polja“

2) „ne postoje magnetski naboji“ (izvori i pokori mag. polja) (MONOPOLI)

3) Faradayev zakon ($\mathcal{U} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$) → „promjena magnetskog polja stvara (kružno) električno polje“

4) Ampérov zakon ($\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \hat{\varphi}$) → „struja stvara kružno magnetsko polje oko sebe“

+

Maxwellov dodatak → „promjena ELEKTRIČNOG polja stvara (kružno) magnetsko polje“
(zbog zakona očuvanja količine naboja)

→ ta 4 zakona zajedno:

⇒ MAXWELLOVE JEDNADŽBE
+ Lorentzova sila =
= cijela i potpuna teorija
elektromagnetizma! (1873)

$$\left[\begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \partial_t \vec{E} \end{array} \right]$$

→ u vakumu ($\rho=0, \vec{j}=0$), uz malo matematike, dobiju se valne jednačbe, to su jednačbe čija rješenja su harmonijski valovi, dakle - mogu postojati elektromagnetski valovi, na primjer:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{E}(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \hat{y} \\ \vec{B}(x,t) = B_0 \sin(\omega t - kx) \hat{z} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\omega}{k} = \lambda \cdot f = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ bržina svjetlosti} \\ B_0 = \frac{E_0}{c} \leftarrow \text{zbog mjernih jedinica, jednake energije} \end{array}$$

[pa dakle i bilo kakvi valovi, jer se od harmonijskih mogu „sastaviti“ bilo kakvi - FOURIEROVA analiza / rastav
(za one koji žele znati više → Google/YT)]

u materijalima: $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

reza el. / mag. svojstva materijala s optičkim

$$\Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} \Rightarrow$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$



→ takvi (EM) valovi prenose energiju:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} = \frac{E_0^2}{c \cdot \mu_0} \sin^2(kx - \omega t) \hat{x} \left[\frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2} \right]$$

Poyntingov vektor

ista jedinica kao i intenzitet

→ INTENZITET EM vala (svjetlosti) = prosjek Poyntingovog vektora tijekom jednog perioda / valne dužine:

$$\Rightarrow I = \frac{E_0^2}{c \cdot \mu_0} \cdot \int_t^{t+T} \sin^2(\omega t - kx) \frac{dt}{T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2$$

isto kao s kosinusom
kod polarizacije ...
(podsjetite se, usporedite)

konstanta

kvadrat
amplitude
titranja
(što smo rekli kod
polarizacije?)

→ kako nastaju EM valovi?

↳ ubrzano gibanje električnih naboja

→ oscilatori (LC titrajni krugovi - antene) [Hertz 1888]

▼ → nasumično gibanje (temperatura - termodinamika)

→ svakakvi procesi u prirodi/svemiru (npr. kozmičke zrake, polarna svjetlost, ...) ili ljudskog porijekla (npr. začočno, rendgensko zračenje, ciklo/sinkrotronsko zračenje, ...)

→ SPEKTAR EM VALOVA (kakvih sve ima; više u knjizi)

zajedno: radio-spektar

→ radiovalovi ($> 0.1 \text{ m}$, $\lesssim 1000 \text{ MHz}$)

→ dugi ($> 1 \text{ km}$, $\lesssim 100 \text{ kHz}$): komunikacija s podmornicama, ...

→ srednji ($> 100 \text{ m}$, $\lesssim 1 \text{ MHz}$): AM radio (velike udaljenosti), radioamateri, ...

→ kratki ($< 100 \text{ m}$, $\gtrsim 1 \text{ MHz}$): FM radio, televizija (VHF, UHF), ...

→ mikrovalovi ($\approx 10 \text{ cm} - 1 \text{ mm}$, $\approx 1 - 1000 \text{ GHz}$)

→ radari, mikrovalne pećnice, ...

rotacije

i vibracije

molekula

→ infracrveno [IR] ($\approx 100 - 1 \text{ } \mu\text{m}$, $\approx 1 - 100 \text{ THz}$)

→ „topla“ tijela, ...

SUNCE

→ (vidljiva) SVJETLOST ($\approx 400 - 700 \text{ nm}$, $\approx 500 \text{ THz}$)

→ ultraljubičasto [UV] ($\approx 100 - 1 \text{ nm}$, $10^{15} - 10^{17} \text{ Hz} \rightarrow \approx 1 - 100 \text{ eV}$)

→ Fotoelektrični efekt (kasnije)...

→ X-zrake ($\approx 1 \text{ nm} - 10 \text{ pm}$, $10^{17} - 10^{19} \text{ Hz} \rightarrow \approx 1 - 100 \text{ keV}$)

→ zaključno zračenje (Bremsstrahlung), rendgen, ...

→ γ -zrake ($< 10 \text{ pm}$, $\gtrsim 10^{19} \text{ Hz} \rightarrow \gtrsim 1 \text{ MeV}$)

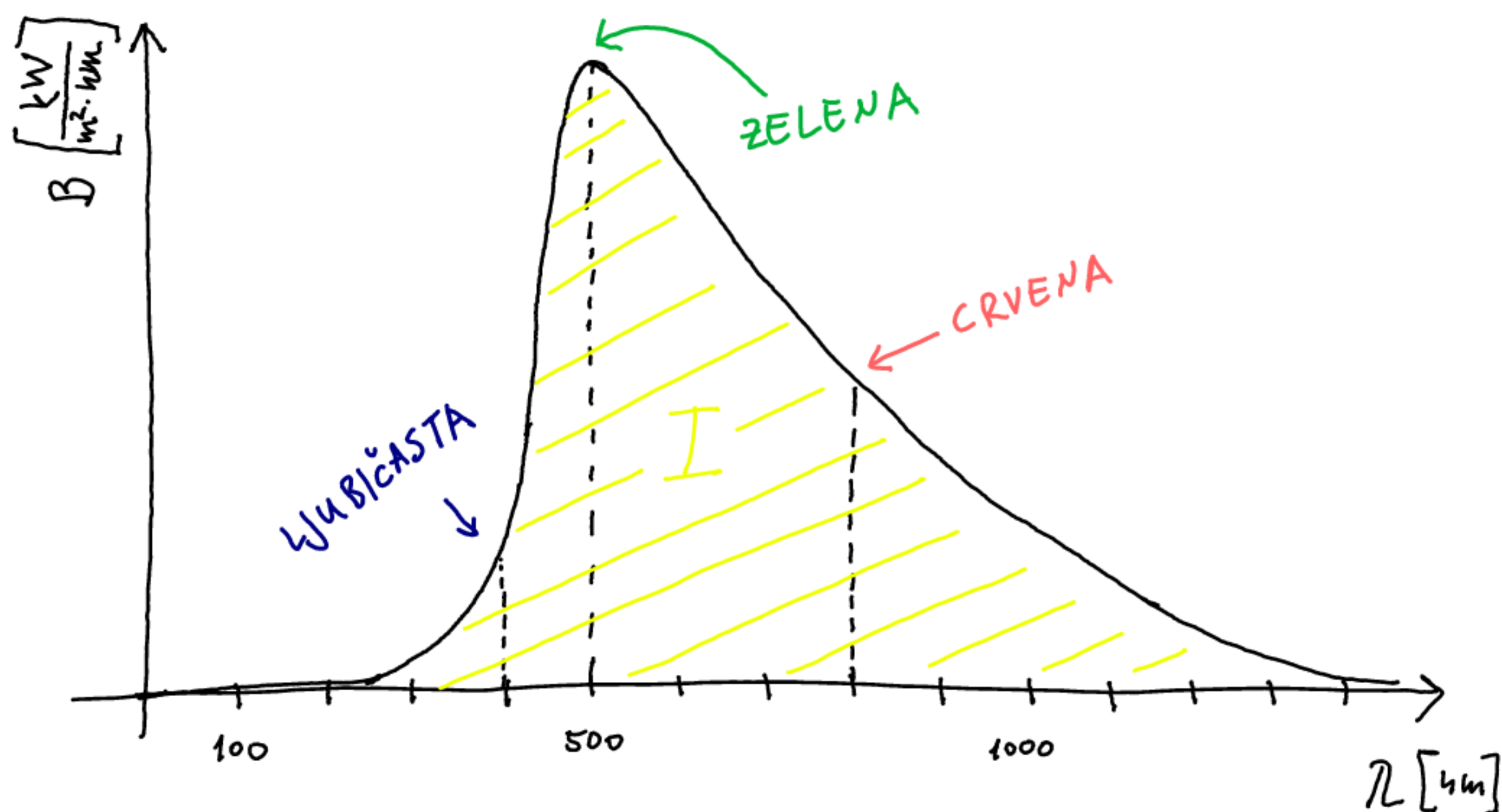
→ kozmičke zrake, radioaktivnost (kasnije)...

→ SPEKTAR (EM) ZRAČENJA (nekog izvora)

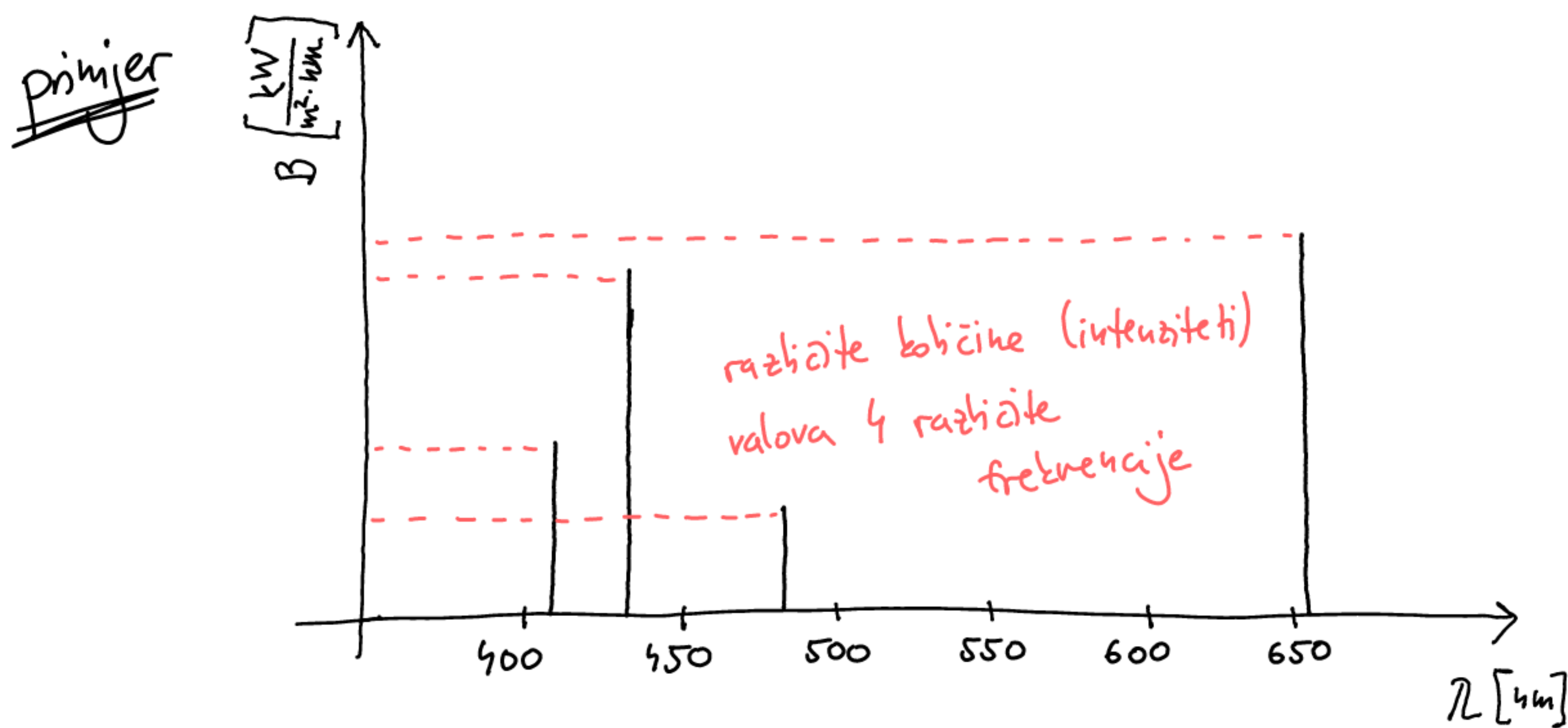
- izvori EM valova (svjetlosti, u širem smislu) uobičajeno emitiraju (strvaraju) zračenje više različitih valnih dužina, i to različite količine zračenja svake od tih frekvencija
- to se može prikazati grafom izračene svjetlosti u ovisnosti o valnoj dužini (ili frekvenciji). Takav graf kolokvijalno se naziva „SPEKTAR ZRAČENJA” i na y-osi se nalazi intenzitet izračene svjetlosti po valnoj dužini (ili nešto tome slično), a na x-osi valna dužina (ili frekvencija) svjetlosti. Ukupni INTENZITET (I) izračene svjetlosti (svih valnih dužina) odgovara površini ispod krivulje (dakle integralu te funkcije).

primjer

Spektar
zračenja
SUNCA
(otprilike)



→ spektri zračenja mogu biti kontinuirani, kao što je ovaj od Sunca, dakle da tijelo zrači na svim valnim dužinama / frekvencijama u nekom rasponu, ali mogu biti i DISKRETNI, a to znači da postoji zračenje na samo konačno mnogo točno određenih frekvencija, na primjer kao kod lasera ili LED dioda ...



→ čestice (elektroni, protoni, ioni, ...) svakog tijela stalno se gibaju nasumično (dakle NE jednoliko pravocrtno), jer su na nekoj temperaturi, pa dakle ZRAČE → TERMALNO ZRAČENJE

→ spektar termalnog zračenja je KONTINUIRAN, kao od Sunca, i svako tijelo ga ima !

EUGEN ROŽIĆ, prof.