

Fotoni kao najvažniji nosioci informacija

- Elektromagnetna interakcija između naelektrisanih čestica spada u jedno od četiri fundamentalna međudajstva u prirodi.
- Tokom istorije nauke došlo do, postepenog razumevanja da su pojave elektriciteta, magnetizma, kao i svetlosti zapravo samo različite manifestacije suštinski istog fenomena.
- Ovakav tip, bazične interakcije odvija se posredstvom fotona.

Svakako najviše informacija koje smo dobili o nebeskim telima saznali smo zahvaljujući analizi njihovog zračenja.

- Kako bi objasnio pojavu fotoelektričnog efekta, Albert Ajnštajn je zauzeo stav, da je svetlost zapravo skupina svojevrsnih paketića jasno određene energije.
- Obično se za Luisa vezuje da je među prvima uveo termin foton u nauci.
- Albert Ajnštajn je dobitnik Nobelove nagrade baš za doprinos rasvetljavanju prirode fotoelektričnog efekta, te, samim tim doprinosa na polju kvantne mehanike.
- Fotoelektrični efekat podrazumeva emisiju elektrona (tzv. fotoelektrona) nakon što elektromagnetno zračenje (npr. vidljiva svetlost) pogodi (obasja) neku, npr. metalnu površinu, pod odgovarajućim uslovima.
- Može slobodno reći da je Ajnštajn svojevrstan otac savremenih digitalnih kamera, koje su u veoma širokoj upotrebi.

- Fotoni, elektromagnetno zračenje, elektromagnetni talasi i svetlost, su u suštini sve samo različiti termini i modeli, nastali kroz istoriju nauke, za, u principu jedan te isti kvantni objekat, odnosno prenosioca elektromagnetne interakcije.
- U okviru klasične elektrodinamike, elektromagnetna interakcija se adekvatno opisuje uz pomoć odgovarajućeg, elektromagnetnog polja, koje se može okarakterisati vektorskim funkcijama prostornih koordinata i vremena, konkretno tzv. jačinom električnog polja i magnetnom indukcijom.
- Pod terminom klasično u fizici podrazumeva opis prirode na velikim skalama, odnosno tada kada se zakoni kvantne mehanike mogu zanemariti.
- U sredinama kao što su plazma i vakuum se često koristi termin magnetno polje umesto magnetna indukcija.
- Uz pomoć pomenutih fizičkih veličina se tako može izraziti i sila kojom elektromagnetno polje deluje na svaku naelektrisanu česticu koja se u njemu nalazi, tzv. Lorencova sila.

- Potpuni opis elektromagnetnog polja, te interakcije zračenja sa materijom daje kvantna elektrodinamika, koja je u svojoj osnovi relativistička kvantna teorija polja.
- Kao i svi drugi kvantni entiteti, tako se i prenosioci elektromagnetne interakcije u nekim situacijama (ogledima) mogu manifestovati kao talasi, a ponekad baš kao klasične čestice.
- Vodeći računa o tzv. čestično-talasnom dualizmu kvantnih objekata, fotonu se tako mogu asocirati odgovarajuća talasna svojstva, i obrnuto.
- Pokazalo se da je elektromagnetna energija koju nose fotoni zapravo kvantovana, odnosno da se prenosi baš u diskretnim paketima, i to jasno određene količine energije.

- Energija jednog elektromagnetnog paketa (jednog fotona) proporcionalna je frekvenciji ν korespondentnog talasa, $\mathcal{E} = h\nu$, pri čemu je tzv. Plankova konstanta baš $h \approx 6.626 \times 10^{-34}$ Js.
- U velikom broju savremene literature je sve više i više običaj da se koristi tzv. SI sistem jedinica.
- Ipak, i u fizici i u astronomiji se odomaćilo da se vrednosti fizičkih veličina često izražavaju u specifičnim jedinicama koje se razlikuju od onih iz SI sistema.
- Elektronvolt je fizička jedinica za energiju i važi da je $1 \text{ eV} \approx 1.602 \times 10^{-19}$ J.
- U astronomiji se kao jedinica za energiju koristi i erg, pri čemu važi $1 \text{ J} = 10^7$ erg.
- Tako se mogu razlikovati fotoni različitih energija, odnosno frekvencija.
- Od najnižih energija ka najvišim imamo radio-talase, mikrotalase, infracrveno zračenje, vidljivu svetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko ili X-zračenje, te konačno i tzv. γ -zrake.

- Elektromagnetni talasi kroz vakuum prostiru brzinom intenziteta $c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 2.998 \times 10^8\text{ m/s}$, tzv. brzinom svetlosti (u vakuumu) ili brzinom prenosa elektromagnetnog signala.
- Prema rezultatima savremene fizike, to je ujedno i najveća moguća brzina prenosa energije i informacije.
- Prilikom prostiranja elektromagnetnog zračenja kroz vakuum može se pisati da je $\lambda \nu = c$, gde je sa λ označena odgovarajuća talasna dužina.
- To je zapravo iskaz konkretne disperzione jednačine za elektromagnetne talase koji se prostiru kroz vakuum konstantnom brzinom intenziteta c .

Talasna dužina, λ , je rastojanje između dva uzastopna brega (maksimuma intenziteta) tj. dve uzastopne dolje (minimuma intenziteta) – Izražava se u jedinicama dužine.

Frekvencija talasa, ν , predstavlja broj talasnih maksimuma (ili minimuma) koji prođu pored posmatrača u jednoj sekundi.

- Disperziona jednačina se obično zapisuje kao zavisnost kružne frekvencije $\omega = 2\pi\nu$ od talasnog broja $k = 2\pi/\lambda$, te za slučaj prostiranja elektromagnetnih talasa kroz vakuum važi $\omega(k) = ck$.
- U drugim, materijalnim sredinama disperziona jednačina može poprimiti komplikovaniji oblik, pa i veza između frekvencije i talasne dužine može postati složenija.
- Disperziona jednačina sledi iz talasne jednačine, koja pak proizilazi iz osnovnih relacija elektrodinamike.

Kada svetlost prelazi iz jedne u drugu sredinu menjaju se brzina i talasna dužina svetlosti, dok frekvencija svetlosti ostaje ista.

- Energija jednog konkretnog fotona je data preko izraza $\mathcal{E} = hc/\lambda$ u vakuumu.
- Što je, u tom slučaju energija jednog fotona veća, frekvencija talasa je viša, a talasna dužina onda kraća.

- Fotoni u interakciji sa materijom, u zavisnosti od ogleda ispoljavaju kako čestičnu, tako i talasnu prirodu.
- Ispostavlja se da je talasna priroda prenosioca elektromagnetne interakcije izraženija na manjim energijama fotona, dok je za najviše frekvencije baš dominantna čestična priroda (može se reći da je tada upravo izražena veća lokalizovanost talasnog paketa).
- U vidljivoj oblasti su, u zavisnosti od izabranog tipa eksperimenta, skoro podjednako zastupljene obe manifestacije ovih kvantnih objekata.

- Fotoni su po svojoj prirodi bozoni, nulte sopstvene (invarijantne) mase, a konačne energije ($h\nu$) i impulsa ($h\nu/c$), te im se može asociirati i odgovarajući pritisak zračenja.
- Uglavnom se smatra da se foton ne raspada spontano u vakuumu, pa ga osobina stabilnosti čini veoma podobnim za izbor nosioca informacija o veoma udaljenim nebeskim telima.
- Usled, uopšte veoma izražene efikasnosti interakcije fotona sa materijom, ovakvi nosioci informacija su veoma osetljivi na fizičko stanje sistema u kojem nastaju.
- Naravno, velika verovatnoća za interakciju fotona sa materijom omogućava i daleko jednostavnije prikupljanje, te prijem ovih nosioca informacija.

Astrofizika

izučava

- stanje materije i fizičke procese u vasioni
- strukturu, fizičke osobine i hemijski sastav nebeskih tela
- moguće izvore energije i mehanizme njenog prenošenja
- postanak i evoluciju zvezda i njihovih sistema



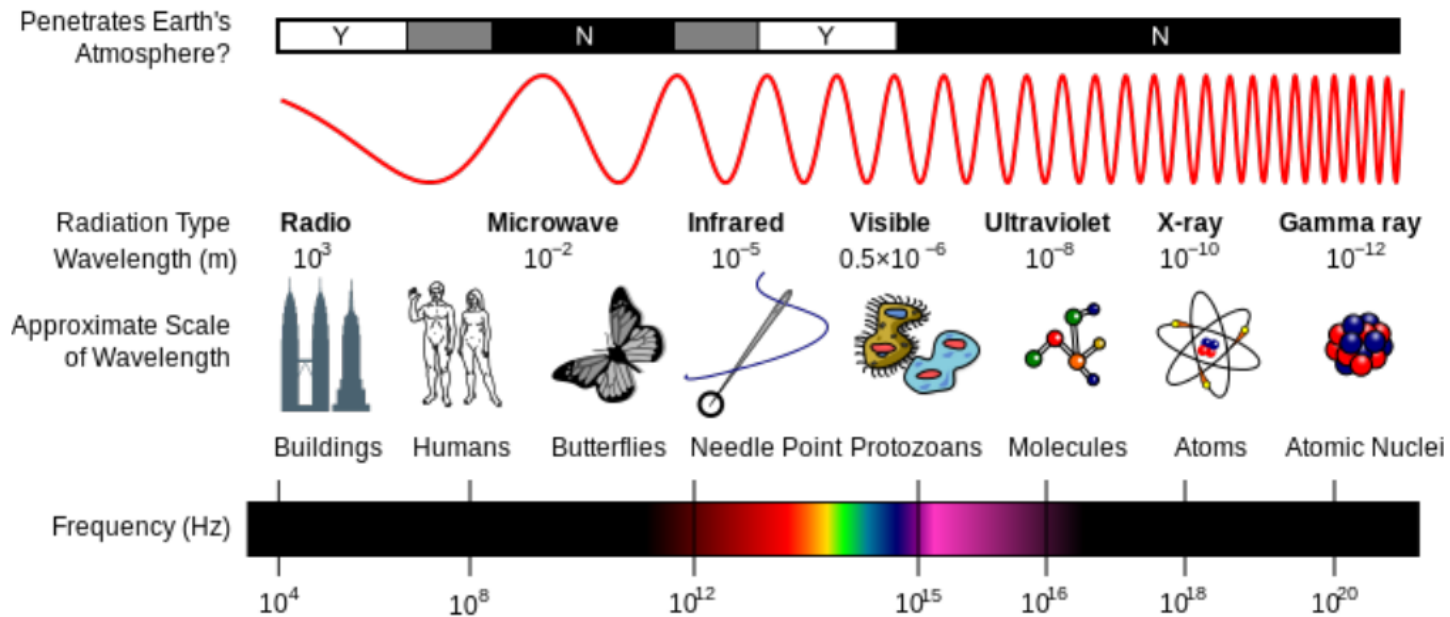
Bunsen i Kirchhoff (Heidelberg, 1859)

Astrofizika je rođena sredinom XIX veka

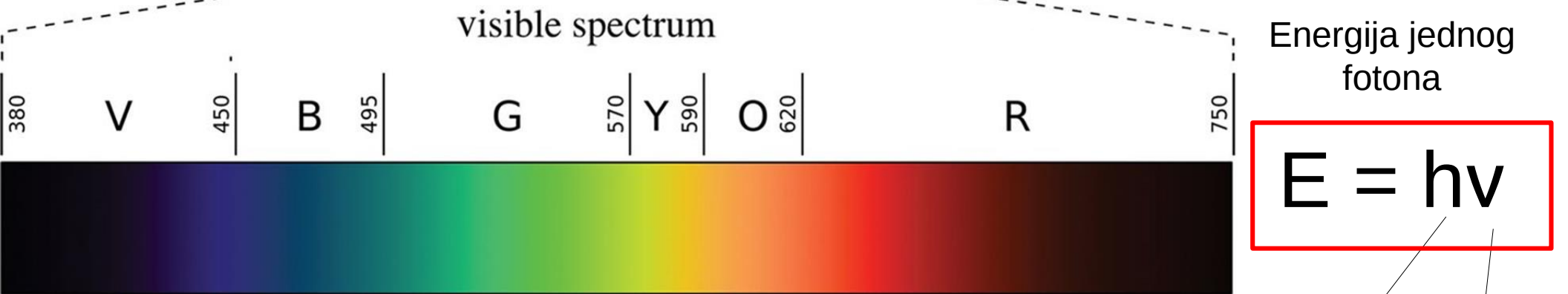
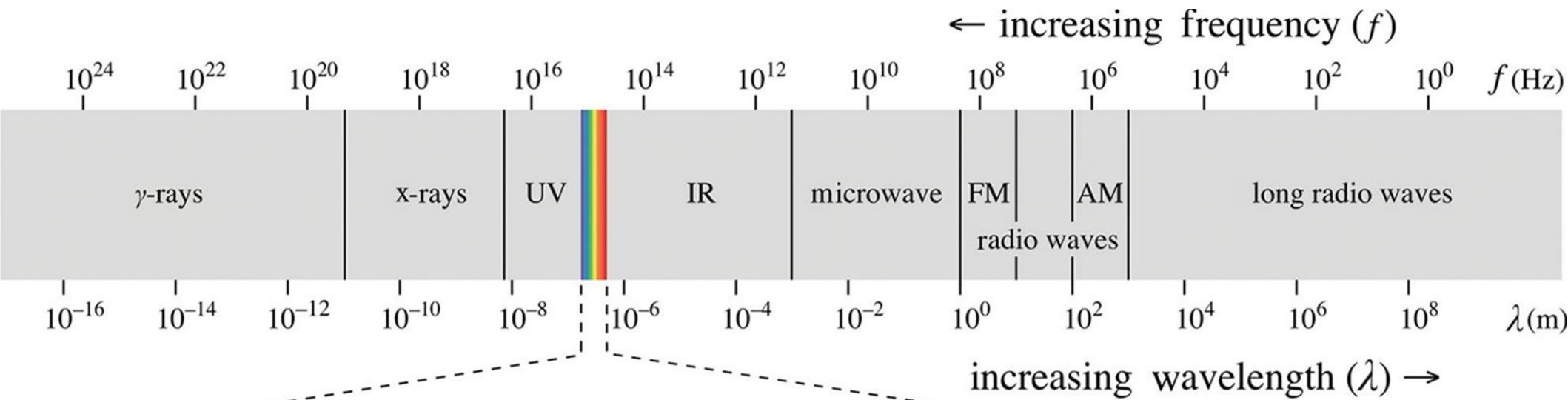
- **Metod spektralne analize (1859) :**
Svaki hemijski element ima svoj osobeni spektralni potpis

Elektromagnetno zračenje

- Da li nebesko telo emituje elektromagnetnu energiju proizvedenu u njemu samom (zvezde) ili je reflektuje (planete i njihovi sateliti,...)



Elektromagnetno zračenje



$$\nu \lambda = c$$

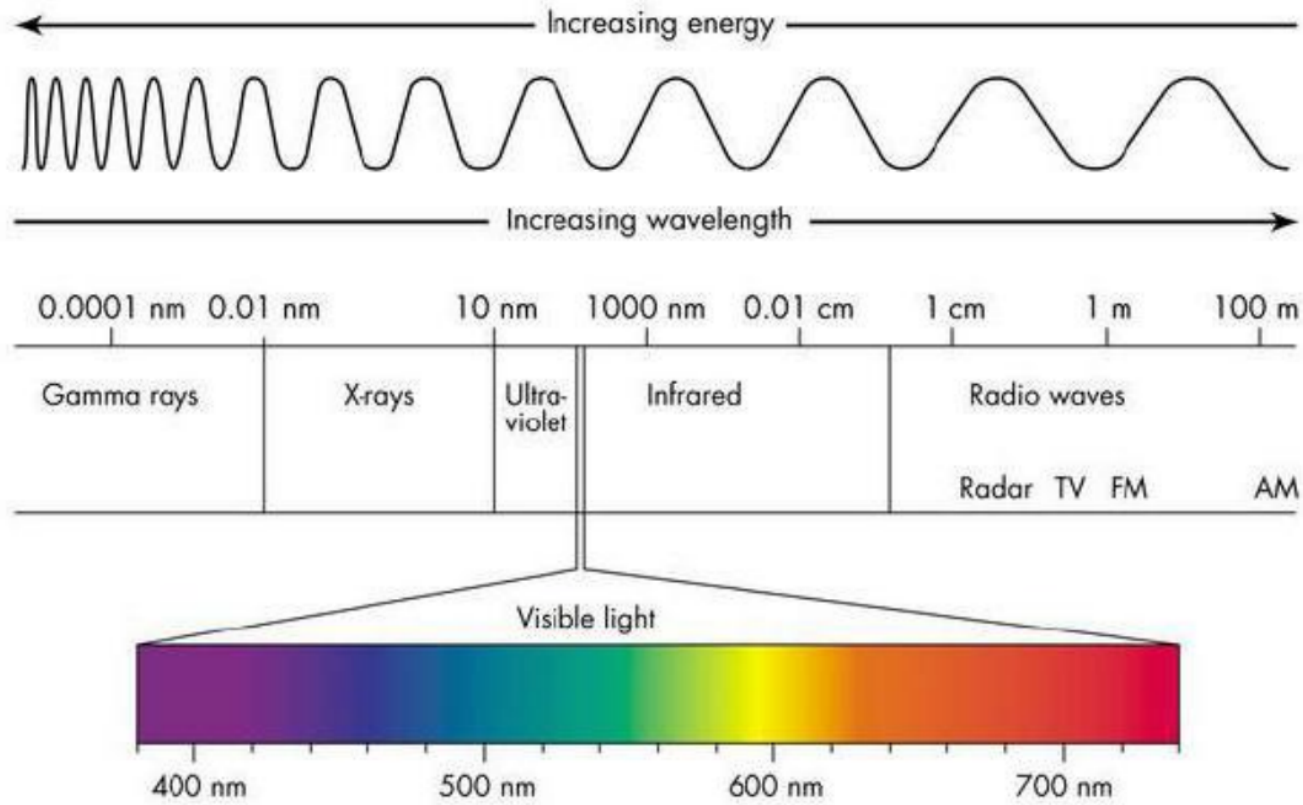
talasna dužina

brzina svetlosti u vakuumu

Plankova konstanta

frekvencija

Spektar elektromagnetnog zračenja

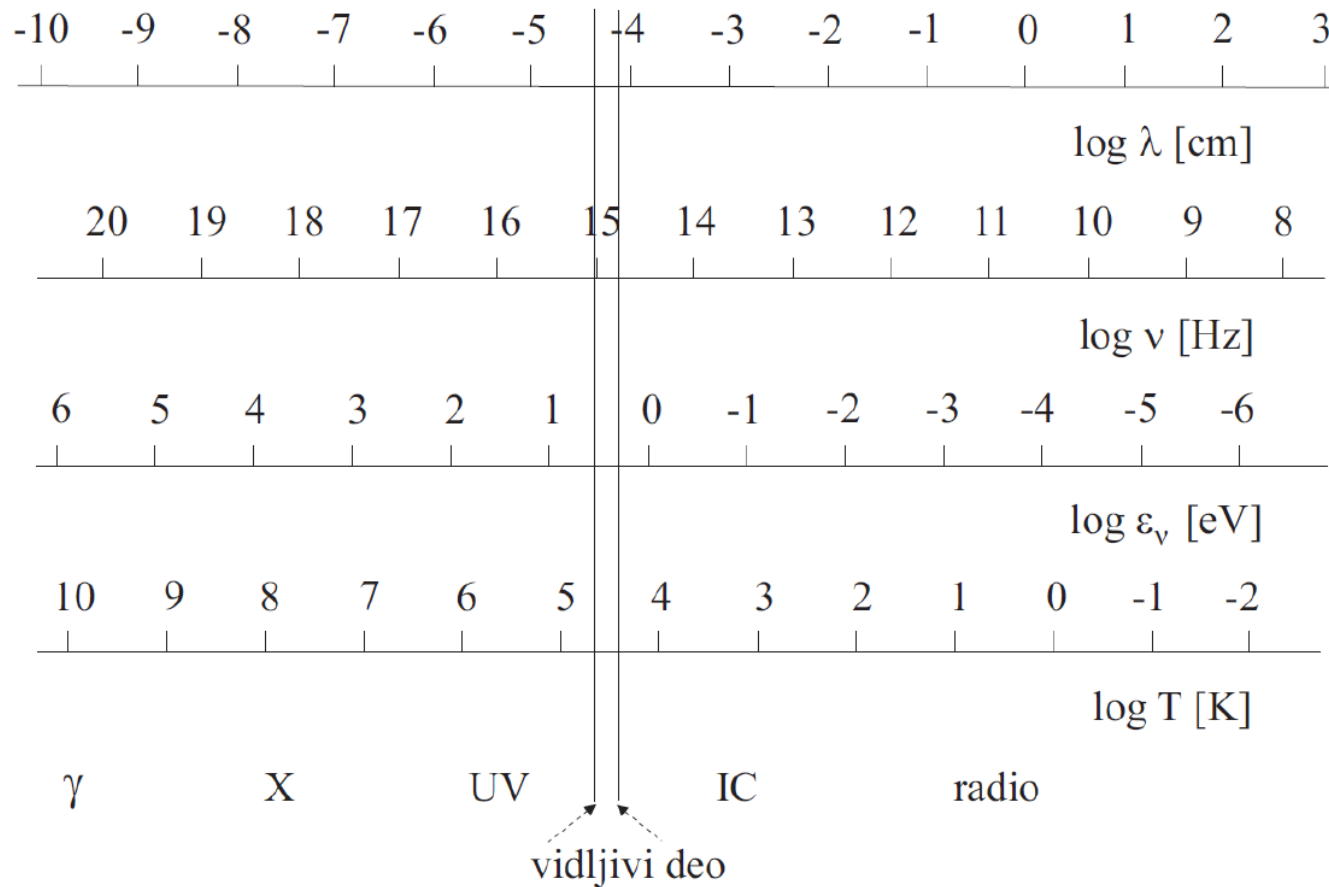


$$\epsilon_{\nu} = h\nu$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

390-450	480-510	550-585	620-760
ljubičasta	plava	žuta	crvena
450-480	510-550	585-620	
indigo	zelena	narandžasta	

Spektar elektromagnetnog zračenja (prema poreklu i načinu detekcije)



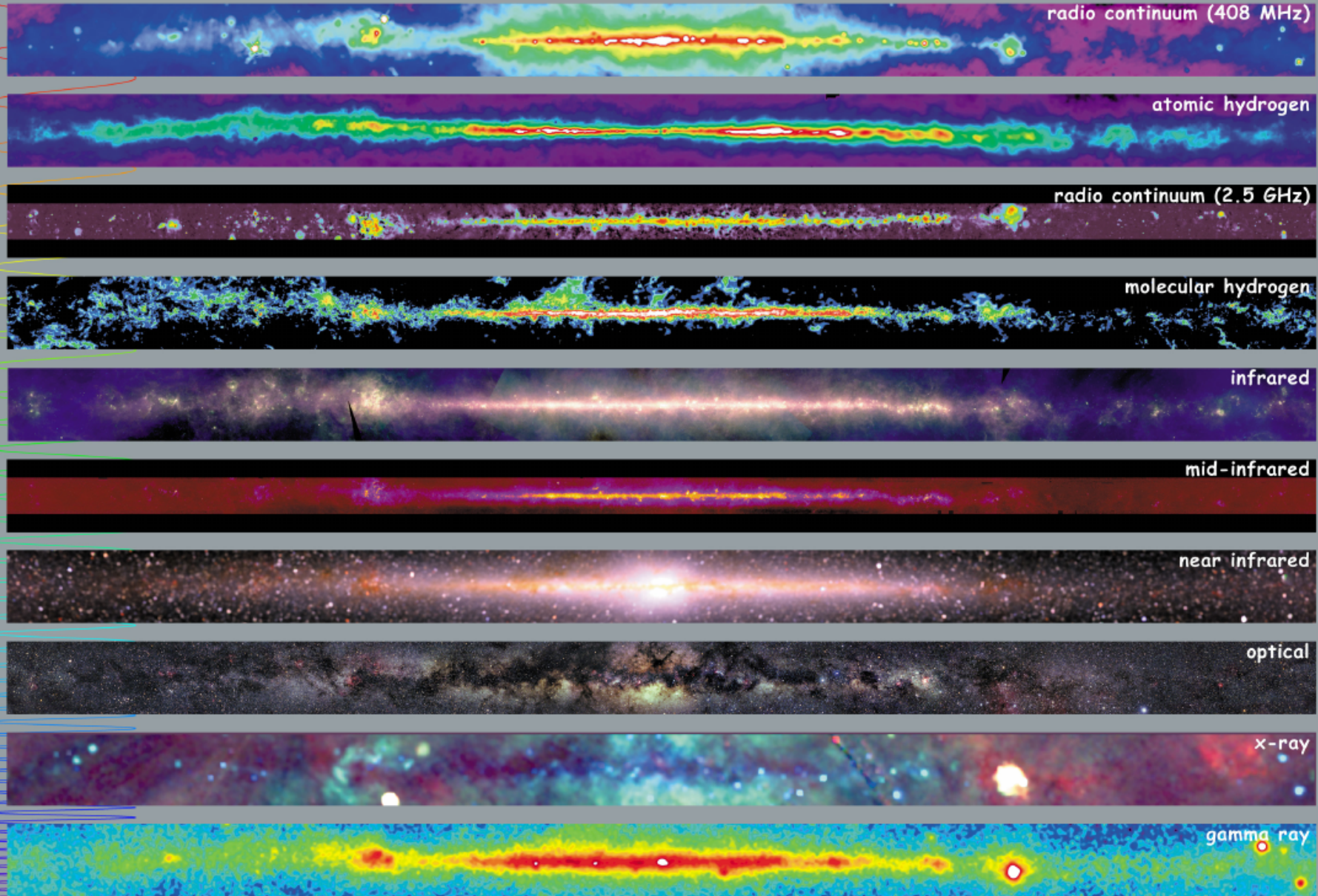
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\varepsilon_\nu = h\nu$$

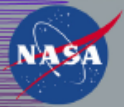
$$T = \varepsilon_\nu / k$$

$$1 \text{ eV} \rightarrow 1240 \text{ nm} \rightarrow 2,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

→ U vidljivom delu spektra, energije fotona su oko 2-3 eV



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



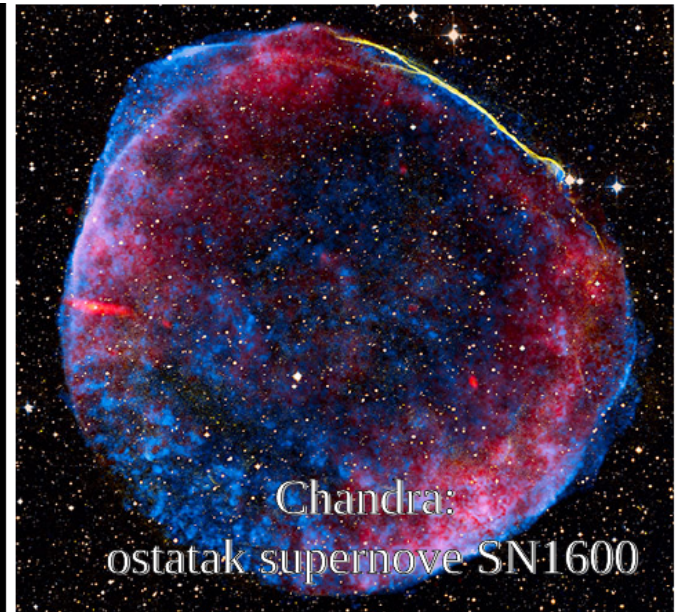
Multiwavelength Milky Way



Hubble Space Telescope:
deo magline M16



Hubble Space Telescope:
planetarna maglina M57

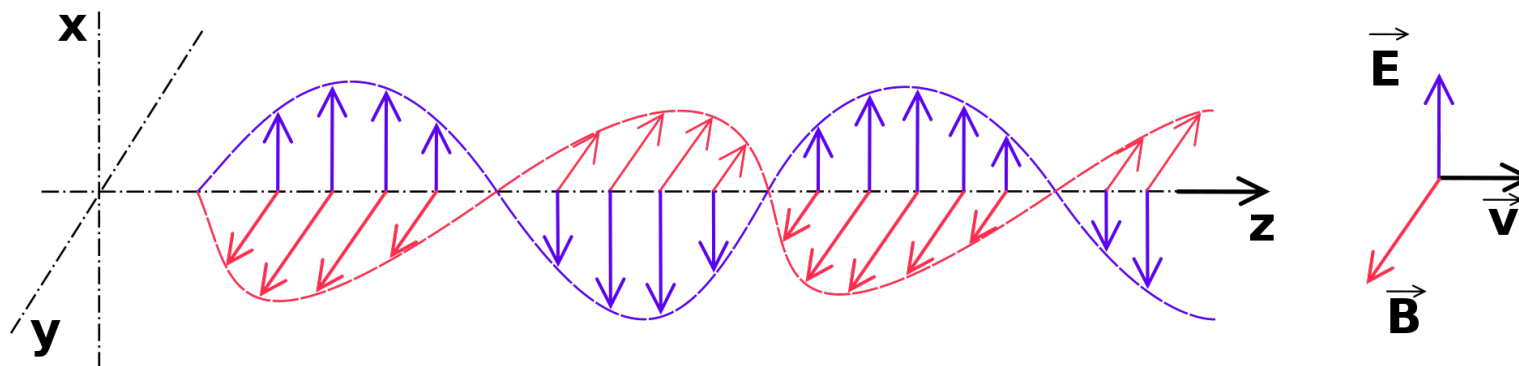


Chandra:
ostatak supernove SN1600



Hubble Space Telescope:
spiralna galaksija M51

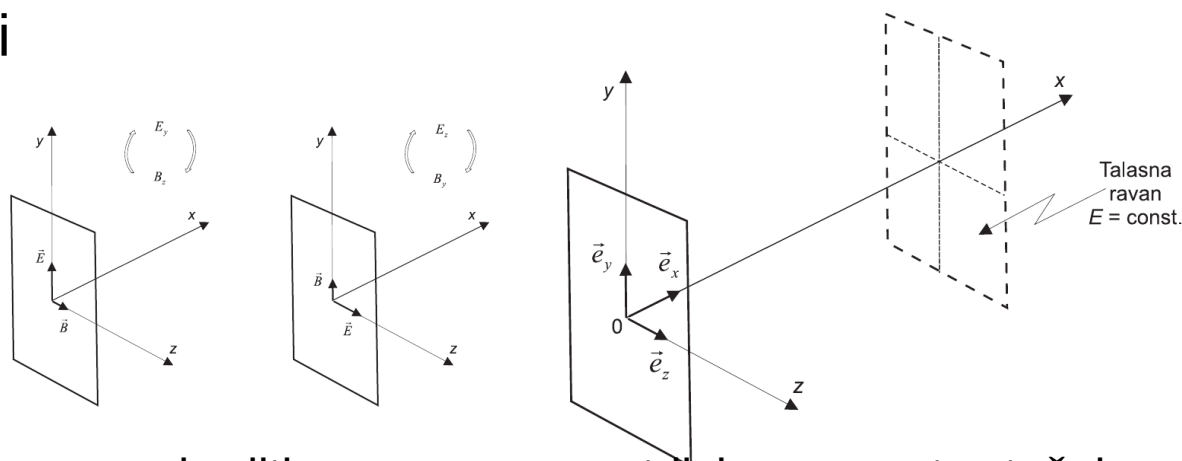
Kao udaljeni posmatrači, nalazimo se u tzv. talasnoj zoni, te elektromagnetno zračenje nebeskih tela možemo aproksimirati ravnim talasima



Ravni monohromatski talasi

Transferzalni talasi

Talasnici paketi



Tip elektromagnetnog talasa može se odrediti prema geometrijskom mestu tačaka konstantne vrednosti inteziteta vektora E (i inteziteta vektora B).

Za elektromagnetne talase je karakteristično da pomenuti skupovi tačaka obrazuju površi, tzv. talasne površi.

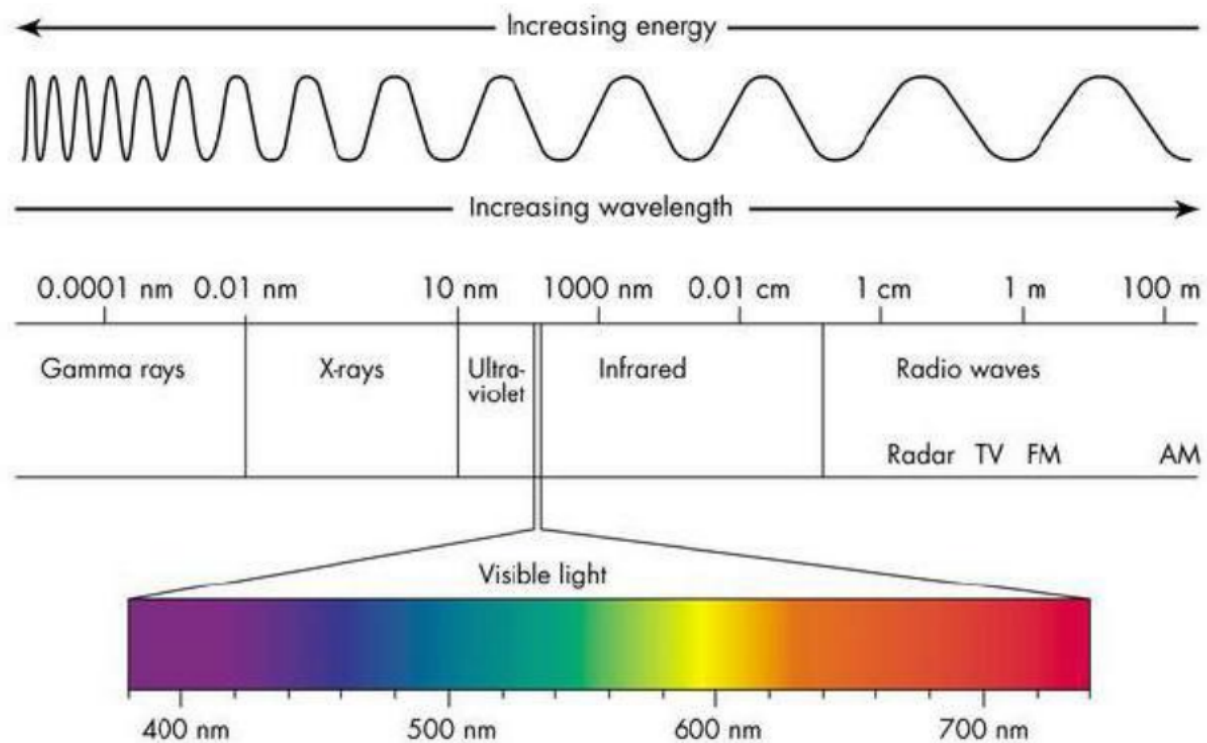
Kod ravanskih talasa ove površi su sistemi medjusobno paralelnih ravni

Oblik talasnog fronta se menja u zavisnosti od svojstva sredine kroz koju se prostire.

Posmatrane (merene) karakteristike zračenja

- **Pravac** iz koga stiže zračenje – definisan sa dva ugla u nekom (sfernom) koordinatnom sistemu - daje informaciju o **položaju tela na nebeskoj sferi**. **Promene pravca** u toku vremena daju informaciju o **kretanju tela na nebeskoj sferi (klasična astronomija)**
Da bi se znao položaj nebeskog tela u prostoru potrebno je odrediti i rastojanje do njega – jedan od najtežih problema u astronomiji !
- **Osvetljenost** (količina energije E zračenja u nekom opsegu λ , koja u jedinici t pada na jedinicu S) zavisi od **količine E koju emituje izvor u jedinici vremena, od rastojanja r do njega i optičkih svojstava sredine na putu (fotometrija)**
- **Spektralna raspodela zračenja (po talasnim dužinama) – spektar** (“spektralna osvetljenost” ili fluks F_λ) zavisi od **fizičkih karakteristika** ($T, \rho, g, B, v_{\text{rad}}, v_{\text{rot}} \dots$) i **hemijskog sastava objekta**, kao i **sredine između objekta i posmatrača (spektrometrija)**
- **Polarizacija zračenja** zavisi od mehanizma zračenja, optičke anizotropnosti sredine, rasejanja na česticama prašine i postojanja B (**polarimetrija**)

Nebeska tela emituju zračenje u širokom opsegu talasnih dužina



- Oko je prirodni prijemnik za vidljivu svetlost
- Zemljina atmosfera dobro propušta vidljivi deo spektra

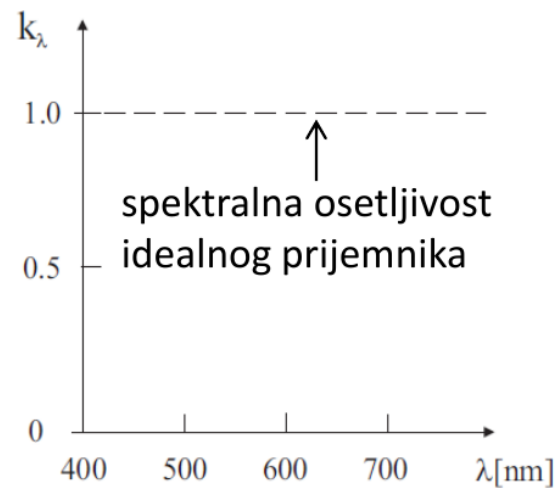
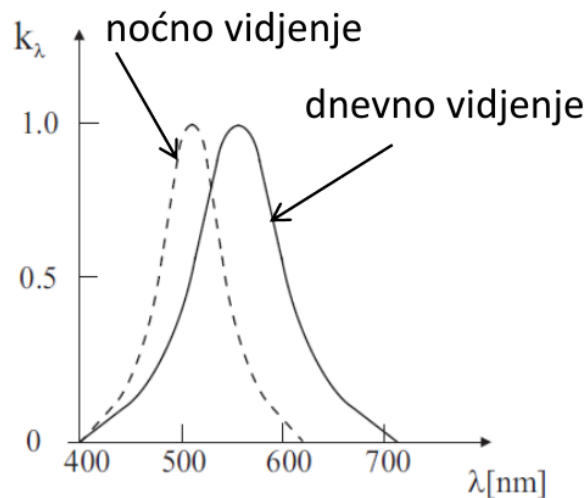
Oko kao prijemnik zračenja

Selektivan prijemnik – oko je osetljivo u uskom opsegu λ , od 390 do 760 nm

Nije idealan prijemnik – nije podjednako osetljivo na svim λ unutar tog opsega

Spektralna osetljivost oka

Koeficijent relativne spektralne osetljivosti oka $k_\lambda = \frac{E_{\lambda_0}}{E_\lambda}$



Najmanja količina svetlosti, za neku talasnu dužinu, koja je potrebna da bi oko reagovalo

Talasna dužina na koju je oko najosetljivije

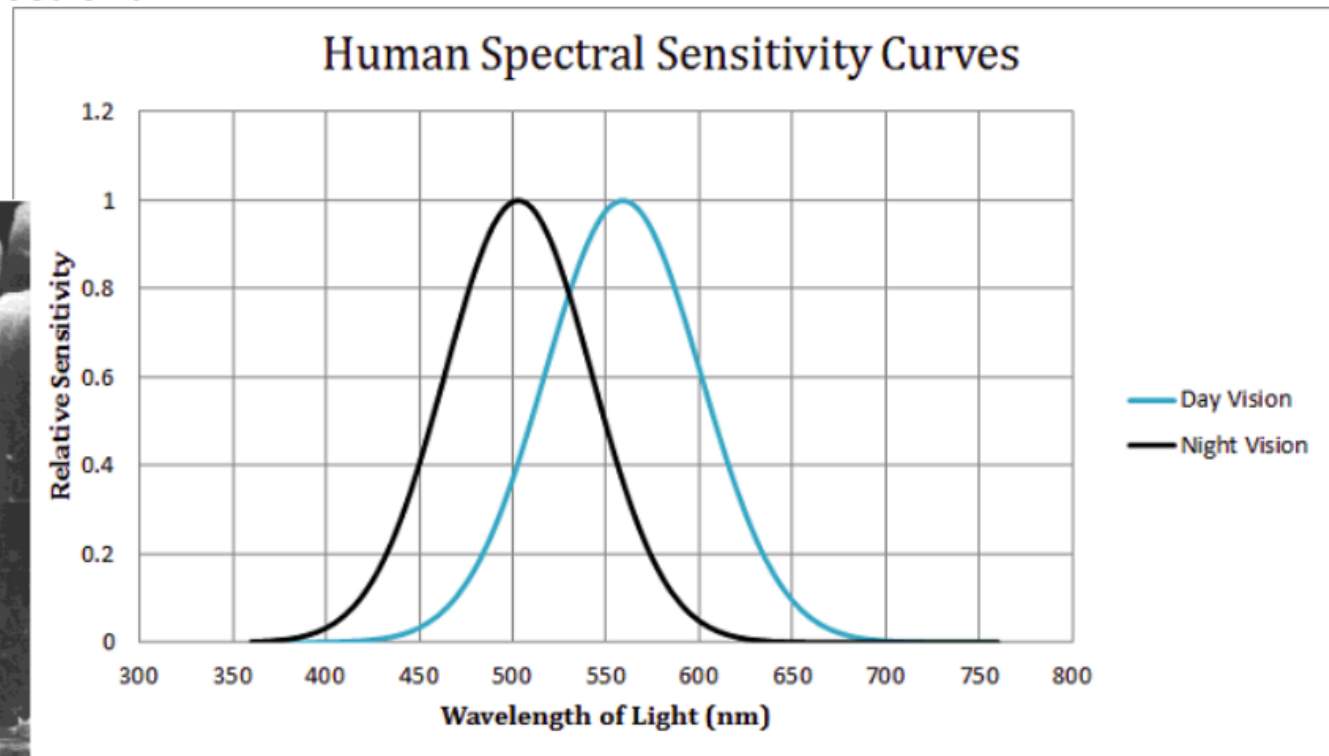
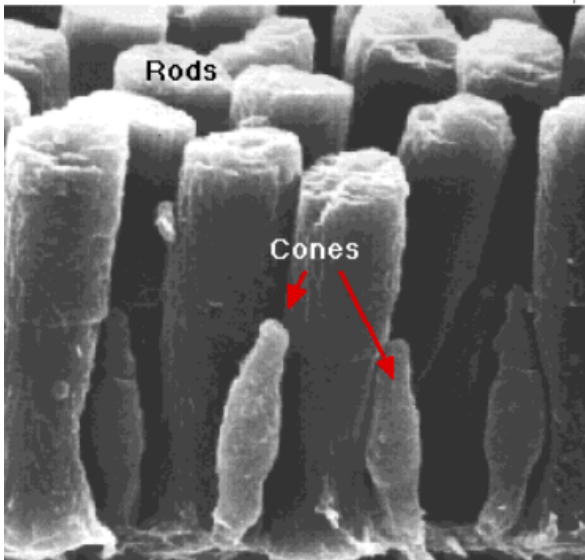
Prag osetljivosti oka (minimalni fluks koji može da detektuje) ≈ 100 fotona u sekundi

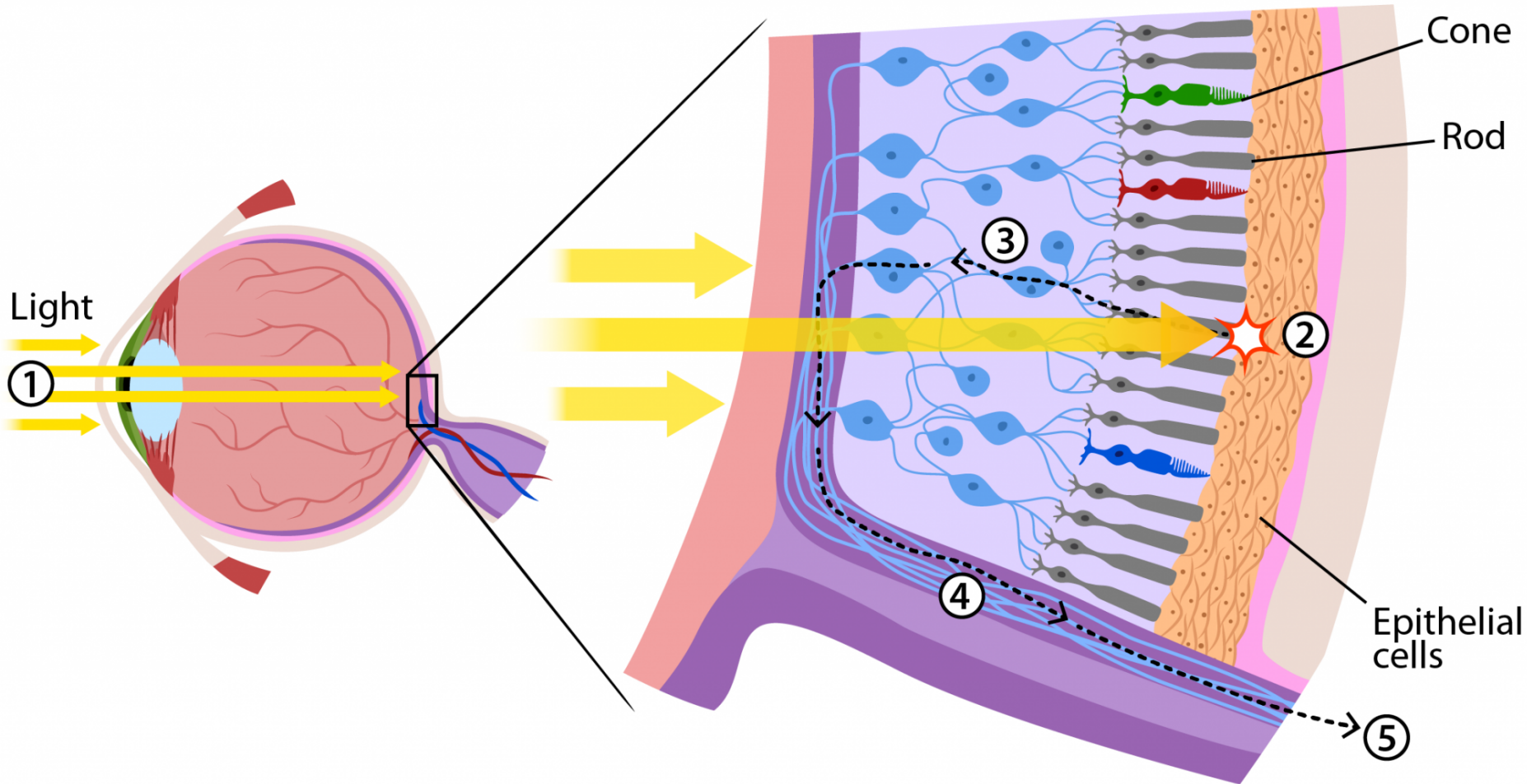
spособnost adaptacije – prilagodjavanje različitim fluksevima (otvorom zenice, fotoreceptori na mrežnjači za dnevno i noćno vidjenje), raspona do 9 redova veličine

spособnost akomodacije – dobijanje oštih likova na mrežnjači bez obzira na udaljenost predmeta (promenom krivine i žižne daljine očnog sočiva)

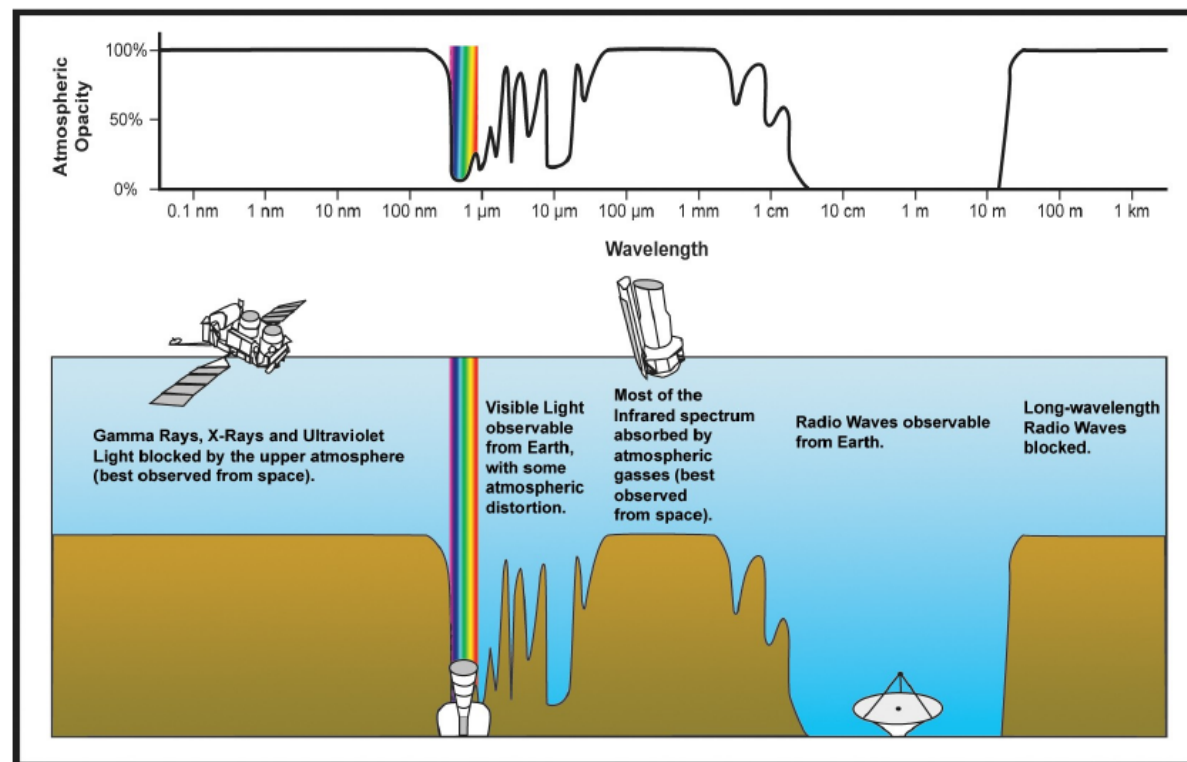
Ljudsko čulo vida

- Selektivni prijemnik (detektor) – 390-760 nm
- Spektralna osetljivost oka
- *Dnevni i noćni vid*





- Propusnost Zemljine atmosfere – dva "prozora": (300nm, 1200nm) i (1cm, 15/20m)
- U vidljivoj oblasti, prozračnost atmosfere je oko 80% (tj. odnos intenziteta propuštenog i upadnog zračenja je 0.8)
- <300nm je potpuno apsorbovano ozonom i molekulima i atomima kiseonika i azota
- U oblasti infracrvenog zračenja najveći deo je apsorbovan vodenom parom i ugljen dioksidom
- Radio-talasi duži od 15/20m se reflektuju o jonosferske slojeve (svojstvo plazme)



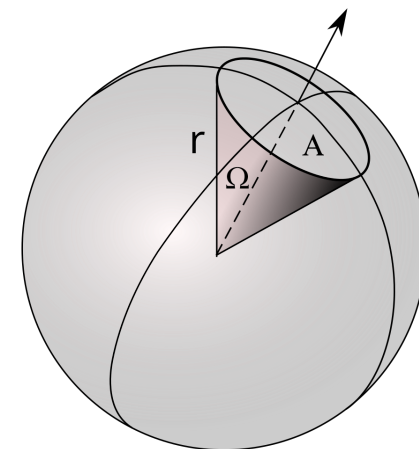
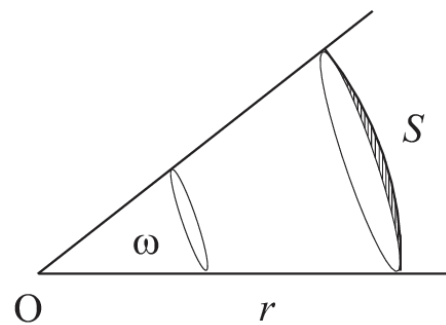
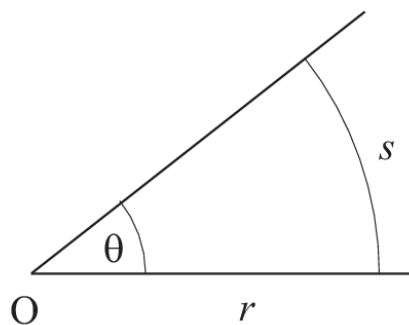
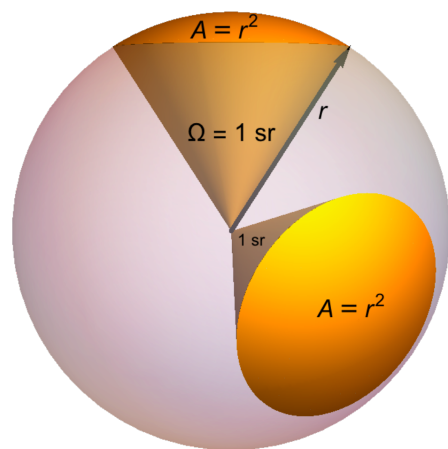
Fotometrija je metoda merenja fluksa zračenja, unutar određenog opsega talasnih dužina, koji stiže do posmatrača.

Prvi poznati fotometrijski rad u astronomiji datira iz II veka pre nove ere.

Zapravo, Hiparh je klasifikovao zvezde po fluksu zračenja kojeg prima posmatrač – tzv. prividnom sjaju

Ako je izvor svetlosti na tako velikoj daljini da se njegove dimenzije mogu zanemariti on se naziva **tačkast**, npr. zvezde

Podsetimo se definicije prostornog ugla ω . Kao što je ugao θ u ravni mera otvora između dve poluprave sa zajedničkim početkom, prostorni ugao je mera otvora konusa. Ugao θ u radijanima nalazimo konstruisanjem kruga radijusa r sa centrom u tački O.



Analogno, prostorni ugao konusa ω u steradijanima nalazi se konstruisanjem sfere radijusa r oko tačke O kao centra. Ako je S površina na sferi koju iseca konus sa temenom u tački O

$$\omega = \frac{S}{r^2} .$$

Tako, pun prostorni ugao oko svetlosnog izvora iznosi 4π steradijana.

Fotometrijske veličine i jedinice

Tačkasti izvori (zvezde)

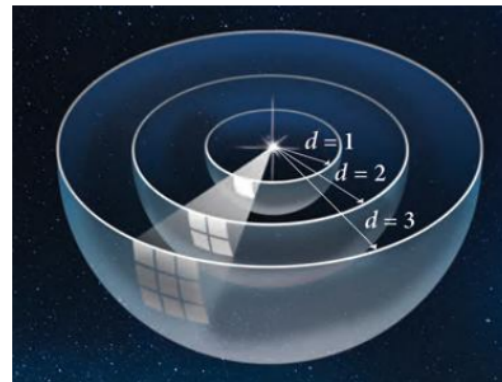
- **Fluks Φ** – ukupna količina energije koja je emitovana u jedinici vremena u svim pravcima [lm – lumen; W]
- **Intenzitet I** - fluks u datom pravcu, unutar jediničnog ω [cd – kandela]

$$I = \Phi / \omega$$

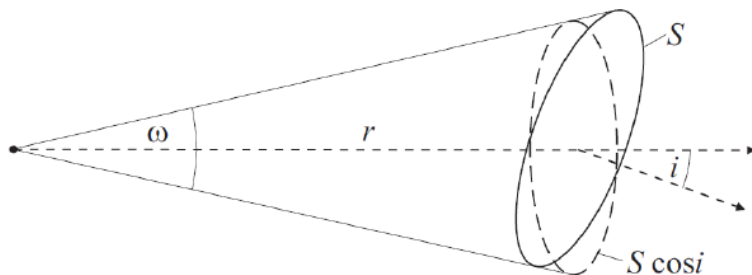
$$\omega = \text{prostorni ugao} = S / r^2 \text{ [sr]}$$

- **Osvetljenost E** [lx=lm/m² – luks; W/m²]

$$E = \Phi / S$$



Osvetljenost opada sa kvadratom rastojanja

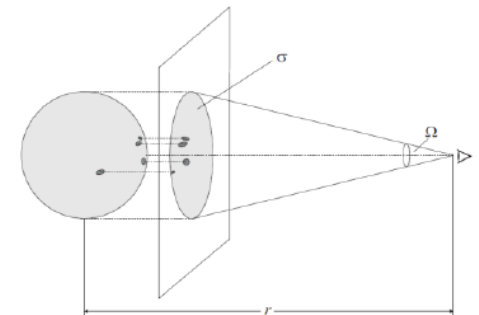


$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{I \omega}{S} = \frac{I S \cos i}{S r^2} = \frac{I \cos i}{r^2}$$

Izvori konačnih dimenzija (Sunce, Mesec, magline)

- **Sjaj izvora B** [nt – nit, sb – stilb]
 $B = I / \sigma = \Phi / (\omega \sigma)$ (σ - vidljiva površina izvora)
- **Osvetljenost E** koju daje izvor konačnih dimenzija na rastojanju r
 $E = \Phi / S = B \sigma / r^2 = B \Omega$ (Ω – prostorni ugao pod kojim se vidi izvor)

projekcija stvarne na ravan normalnu na pravac vizure



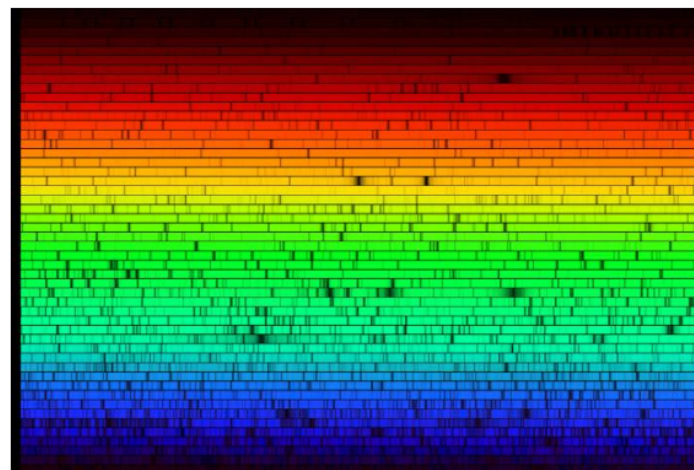
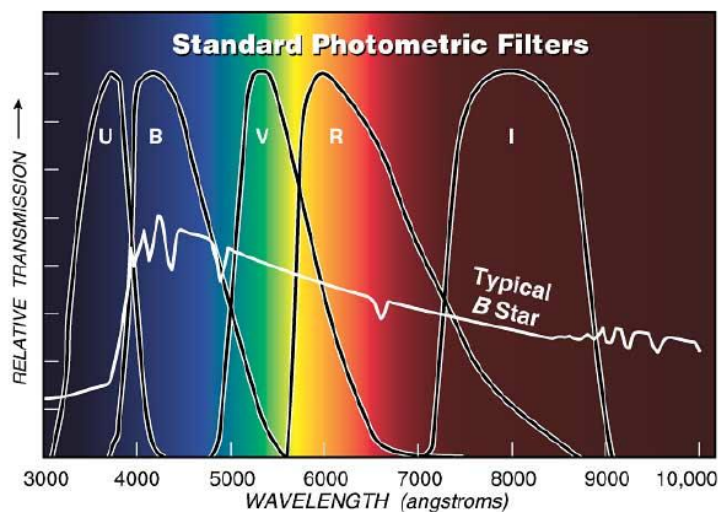
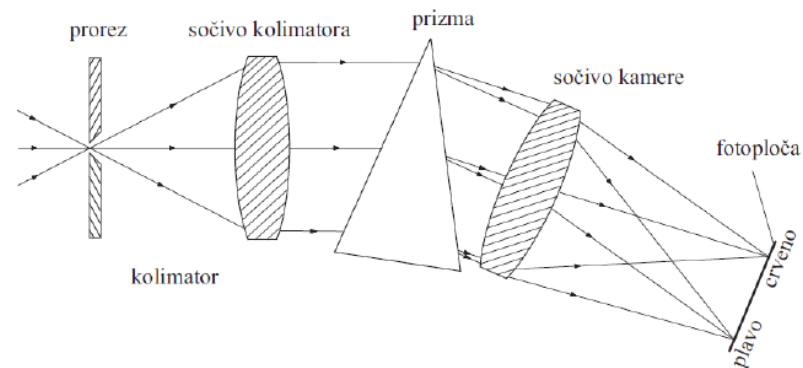
Fotometrija i spektrometrija

Posmatramo zračenje unutar određenog opsega talasnih dužina:

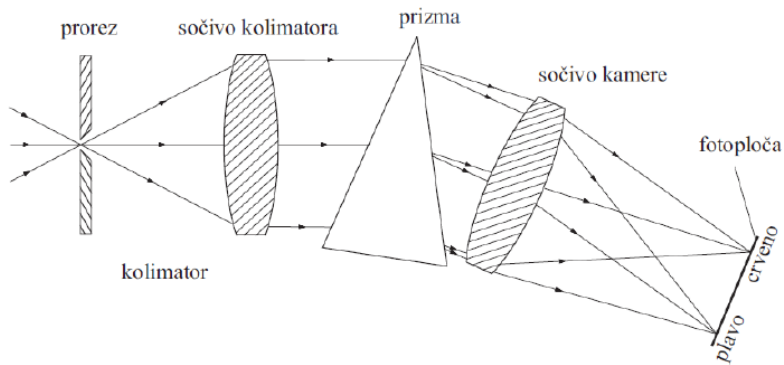
filteri – fotometrija



spektrograf - spektrometrija



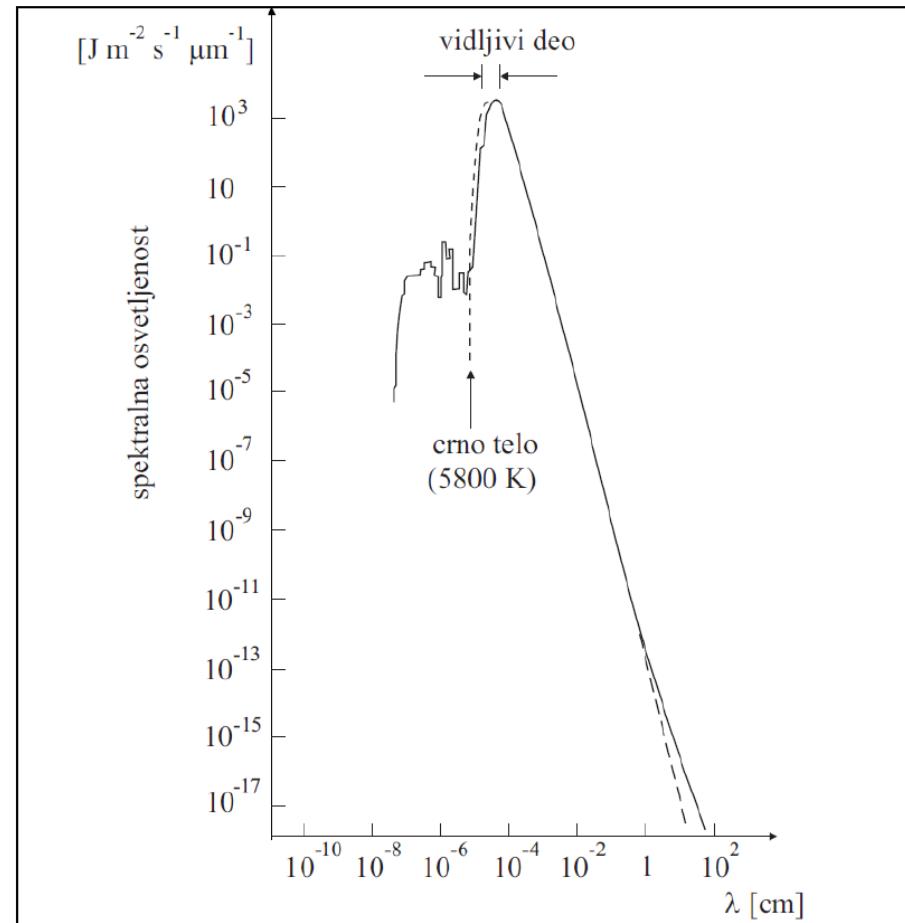
Spektrograf



Veličina koja se meri:

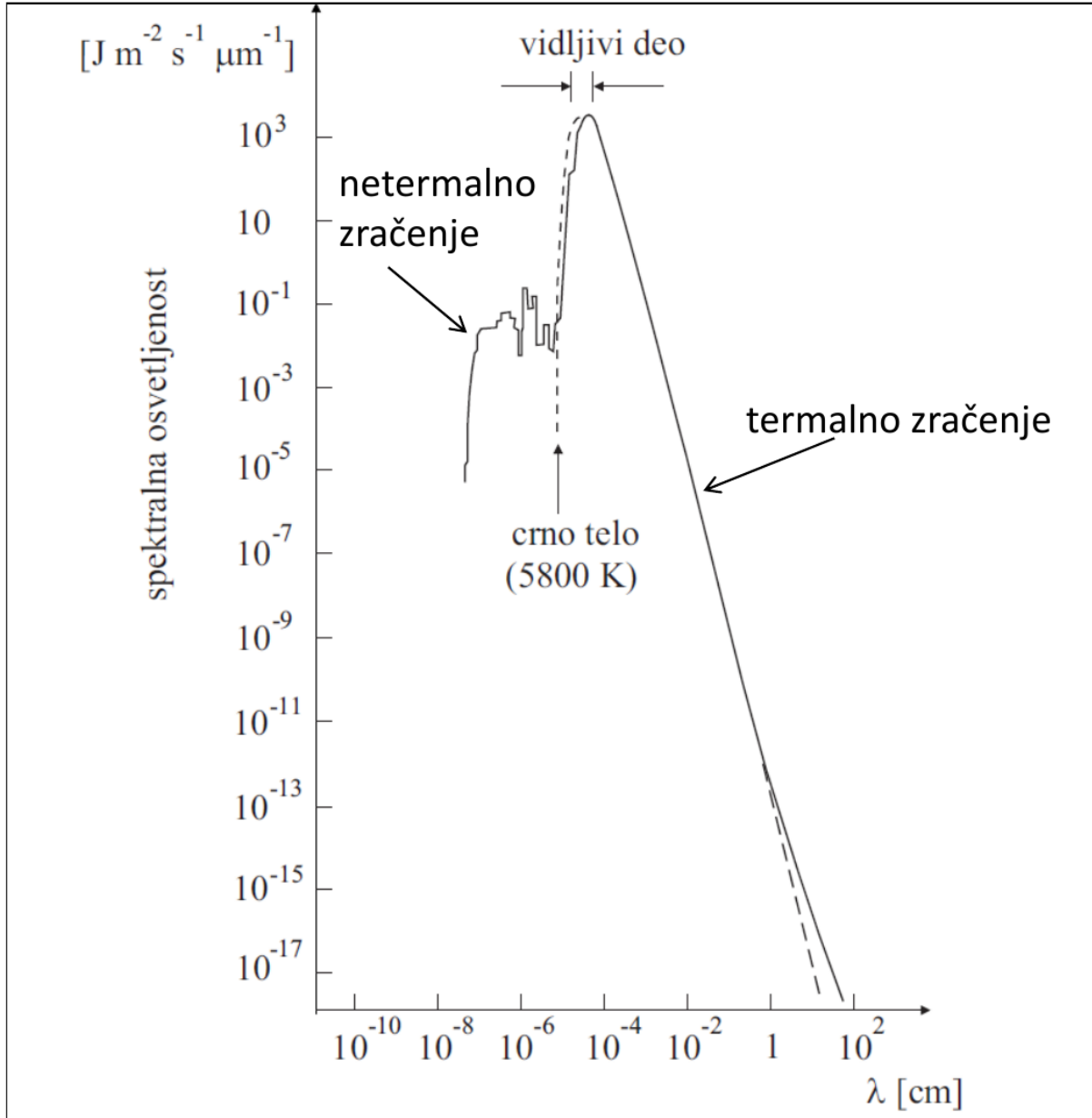
$$F_\nu = \lim_{\Delta t, \Delta \nu, \Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta E_\nu}{\Delta t \Delta \nu \Delta S}$$

$$[\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}]$$



naziva se **spektralna osvetljenost** (fotometrijski termin), odnosno **(monohromatski) fluks** – u spektroskopiji

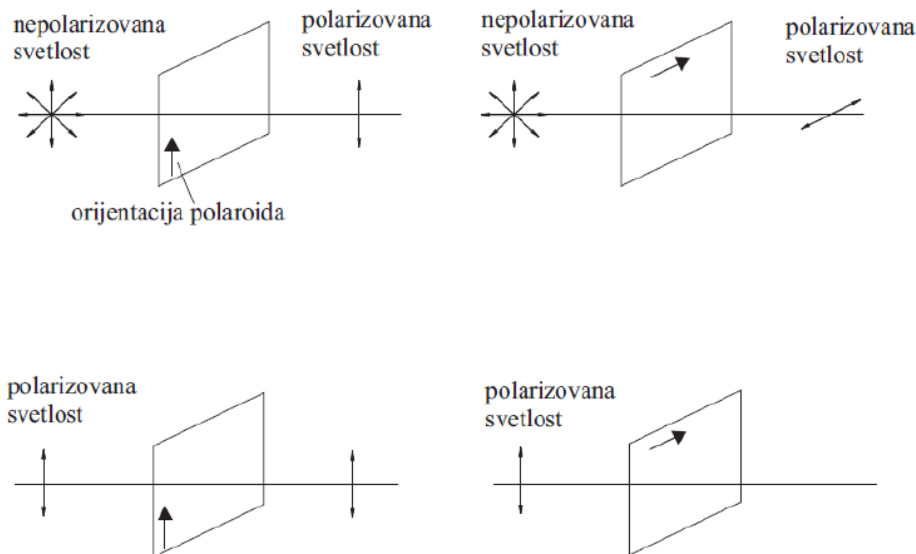
Spektralna raspodela Sunčevog zračenja



Polarimetrija

Polarizacija zračenja može biti rezultat određenog mehanizma zračenja (npr. sinhrotronsko zračenje), optičke anizotropnosti sredine koja zrači ili kroz koju se zračenje prenosi, može biti posledica refleksije svetlosti, rasejanja na česticama prašine ili postojanja magnetnog polja.

Polarizacija se, po konvenciji, odnosi na pravac električnog polja elektromagnetnog talasa. Za talas kažemo da je linearno polarizovan kada vektor električnog polja osciluje u jednom pravcu.



Polaroid – propušta samo zračenje polarizovano u jednom pravcu

Stepen polarizacije [%]

$$p = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Delimična polarizacija – sa promenom ugla polarioida intenzitet varira

Prolaz nepolarizovane i polarizovane svetlosti kroz polarimetar