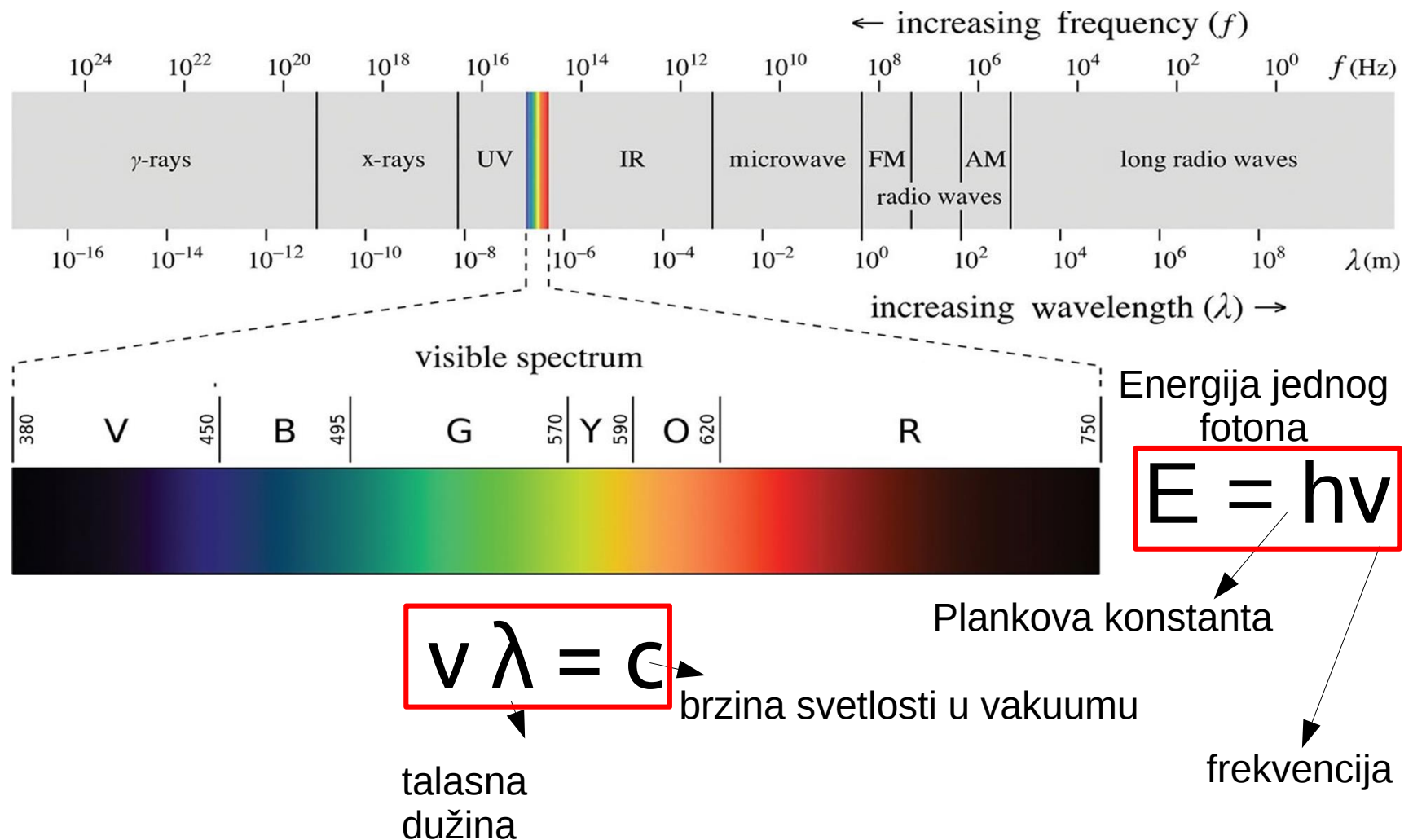


# Elektromagnetno zračenje

- Da li nebesko telo emituje elektromagnetnu energiju proizvedenu u njemu samom (zvezde) ili je reflektuje (planete i njihovi sateliti,...)
- Na nebu posmatramo tačkaste (zvezde) i izvore konačnih dimenzija (Sunce, magline,...) - sve zavisi od odnosa udaljenosti nebeskog tela i njegovih stvarnih dimenzija



# Mehanizmi zračenja (kontinuum)

Klasična elektrodinamika – svako naelektrisanje koje se kreće ubrzano emituje EM zračenje (Larmorova formula)

Tipovi neprekidnog zračenja (neprekidan spektar)

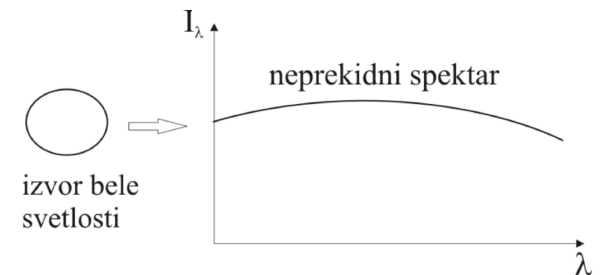
Zračenje sistema u TDR (model apsolutno crnog tela)

Zakočno zračenje

Ciklotronsko i sinhrotronsko zračenje

Inverzno Komptonovo rasejanje

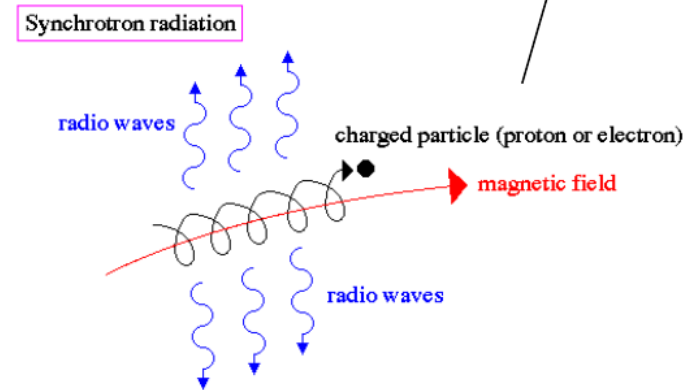
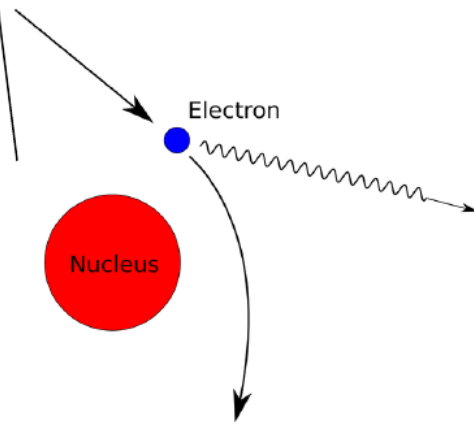
...



Podela po karakteristici ansambla koji zrači: **termalno i netermalno zračenje**

Mehanizmi zračenja: ravnotežno (opisano Plankovom formulom),  
zakočno (naelektrisanje u polju drugog naelektrisanja), sinhrotronsko  
(naelektrisanje u magnetnom polju),...

Svako naelektrisanje koje se kreće ubrzano zrači!!!



synchrotron radiation occurs when a charged particle encounters a strong magnetic field – the particle is accelerated along a spiral path following the magnetic field and emitting radio waves in the process – the result is a distinct radio signature that reveals the strength of the magnetic field

Termodinamički ravnotežan sistem – apsolutno izolovan sistem ne postoji!!!

Svaki izolovani sistem teži stanju termodinamičke ravnoteže – jedna temperatura – ravnotežne raspodele čestica (Maklsvelova, Bolcmanova, Sahina) i fotona (Plankova)

Model zračenja fotosfera zvezda (bez apsorpcionih linija), mikrotalasno pozadinsko zračenje,...

Svaki izolovani sistem spontano teži stanju termodinamičke ravnoteže, TDR

Raspodele čestica koje čine taj sistem teže ravnotežnim raspodelama čestica

- po brzinama (Maksevelova raspodela),

- unutrašnjim stanjima energija (stanjima ekscitacije; definisane samo za vezane sisteme kao što su npr. atomi i molekuli; Bolcmanova raspodela),

- stanjima jonizacije (Sahina raspodela)

u kojima figuriše temperatura kao jedan, konstantan parametar

Relaksacija sistema se odvija putem sudara

Ravnotežna raspodela elektromagnetnog zračenja se NE može ostvariti putem sudara fotona jer je verovatnoća za sudare fotona veoma mala

Ravnotežna raspodela zračenja (fotona) po frekvencijama ostvaruje se kroz interakcije fotona sa atomima (uzastopne apsorpcije i emisije) u izolovanom sistemu na konstantnoj temperaturi (crno telo)

Različiti procesi u plazmi mogu dovesti do emisije EM zračenja. Sudari među česticama, spontana deekscitacija, procesi radijativne rekombinacije, kretanje naelektrisanja u polju drugog naelektrisanja, skretanje naelektrisanja u magnetnom polju,...

Toplotno zračenje emituju sva tela na temperaturi većoj od apsolutne nule i posledica je toplotnog haotičnog kretanja čestica koje čine razmatrani sistem.

Emisiona sposobnost tela zavisi od hemijskog sastava, temperature i drugih fizičkih parametara. Ako emitovano zračenje zavisi samo od temperature takvo zračenje je termodinamički ravnotežno i telo koje tako zrači obično nazivamo idealno (nekada se naziva apsolutno) crno telo i predstavlja sistem u termodinamičkoj ravnotezi. Takvo telo potpuno apsorbuje zračenje svih talasnih dužina. Da bi ovaj apstraktni model mogao da se iskoristi na realnim telima, sistem koji zrači mora biti skoro potpuno izolovan od okolne sredine dok se njegova temperatura ne izjednači u svim njegovim delovima. Takav je slučaj sa zvezdanom unutrašnjosti i veoma veoma grubo sa najdubljim slojevima zvezdane atmosfere.

Zračenje crnog tela je osnovni primer termalnog zračenja

Crno telo je teorijski objekat koji apsorbuje svo zračenje koje na njega padne ali i emituje istu količinu zračenja koju je apsorbovalo.

Stoga možemo reći da je crno telo savršeni apsorber i emiter.

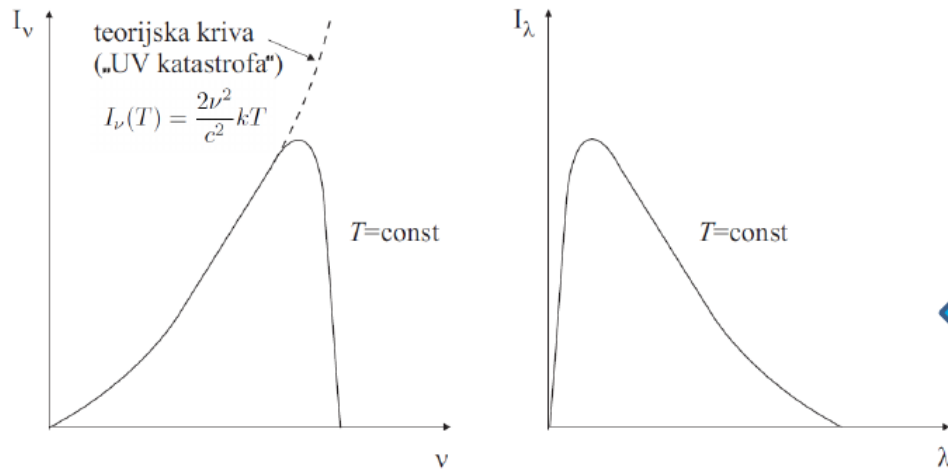
Spektar crnog tela je neprekidan

Savršeno crno telo u prirodi ne postoji ali u mnogo situacija (optički guste sredine) može poslužiti kao veoma dobra aproksimacija



# Termodinamički ravnotežno zračenje = zračenje apsolutno crnog tela

$$I_\nu = f(\nu, T)$$



U TDR, odnos emisije i apsorpcione moći je univerzalna funkcija frekvencije i temperature (Kirhof, 1860):

$$\frac{e_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T)$$

**Zračenje apsolutno crnog tela zavisi samo od njegove temperature.**

**Eksperimentalna kriva** zračenja termički izolovanog (apsolutno crnog) tela temperature T

Pokušaji da se u okviru klasične fizike teorijski izvede zakon zračenja apsolutno crnog tela bili su bezuspešni.

**Teorijska kriva dobijena na osnovu zakona klasične fizike:**

$$I_\nu(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT \quad (\text{“UV katastrofa”})$$

**Planck** (1900) uvodi hipotezu da se energija može emitovati samo u određenim porcijama – kvantima  $\varepsilon = h\nu$  i izvodi teorijski izraz koji dobro opisuje eksperimentalnu krivu zračenja apsolutno crnog tela.

## Plankov zakon zračenja

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3/c^2}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

ovo su dve raspodele!!!  
pazi na Jakobijan transformacije

$$I_\nu = f(\nu, T) = B_\nu(T)$$

$$h\nu \ll kT$$

### Rejli-Džinsov zakon

$$I_\nu^{RJ}(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$$

$T$  – temperatura sjaja  
brightness temperature  
(u radio-astronomiji)

$$h\nu \gg kT$$

### Vinova aproksimacija

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

# Planckove krive za razne vrednosti temperature

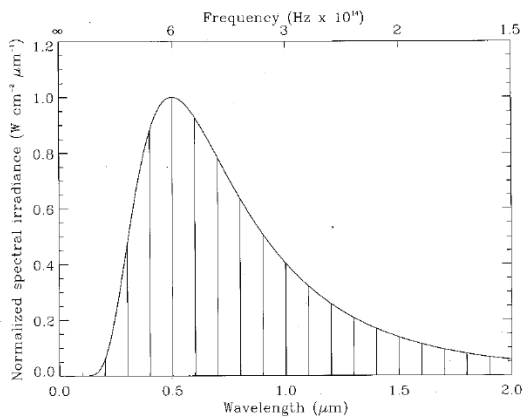
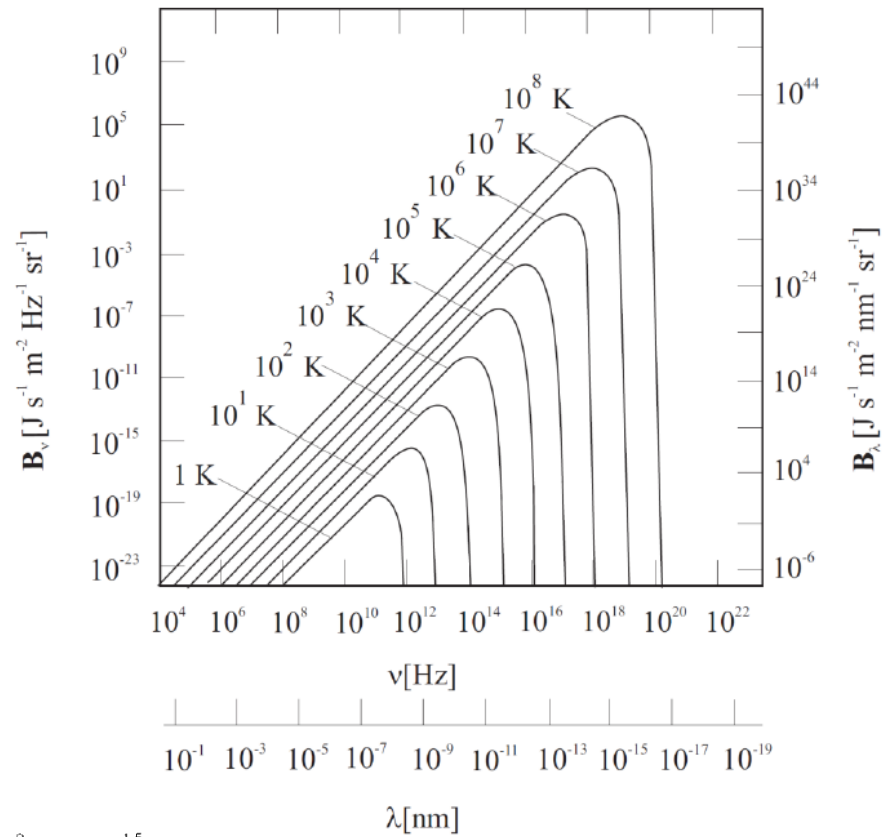


Fig. 3. A 5800 K Planck distribution function divided into equal 100 nm wavelength intervals.

Distribucije se  
zadaju po jediničnom  
intervalu

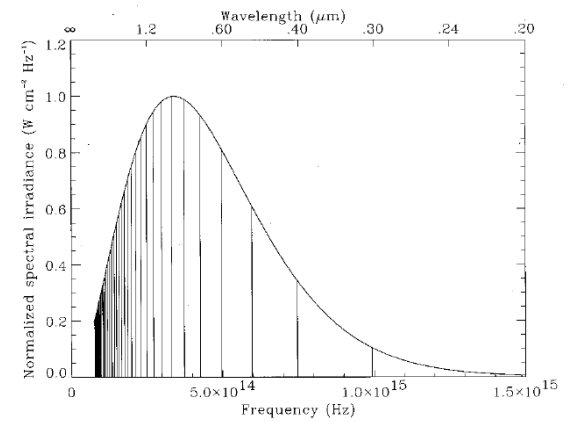


Fig. 4. The same Planck function and wavelength intervals as Fig. 3 transformed into frequency intervals. Note that the frequency intervals are not equal.

$$\nu B_\nu = \lambda B_\lambda = \frac{2k^4 T^4}{h^3 c^2} \frac{x^4}{\exp(x) - 1}$$

$$x = \frac{h\nu}{kT} = \frac{hc}{\lambda kT}$$

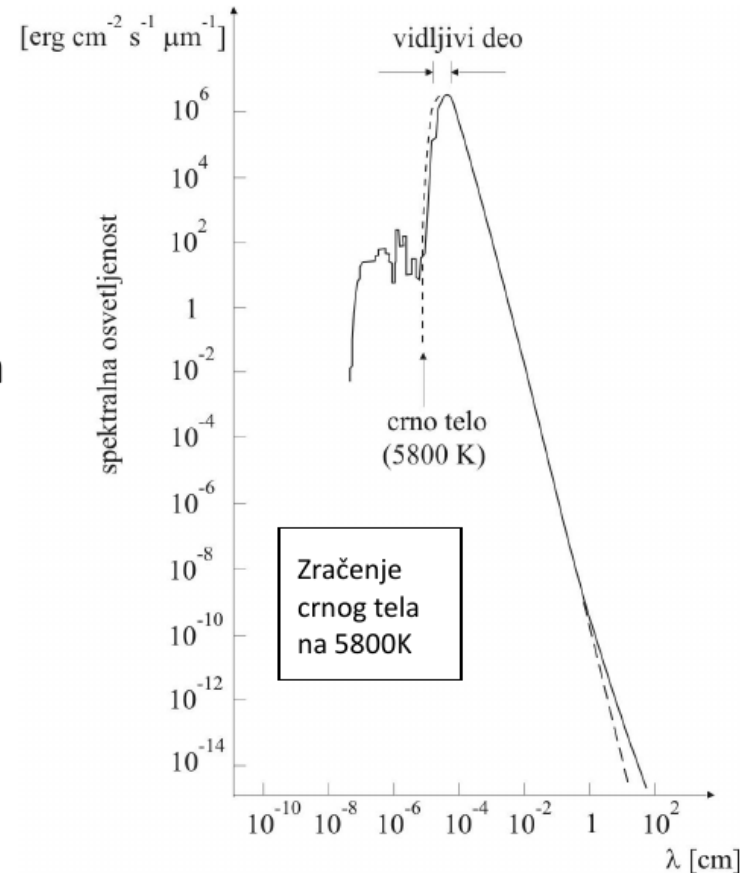
## Spektralna raspodela Sunčevog zračenja

### Zakoni zračenja asolutno crnog tela:

- Wien-ov zakon pomeranja (1893)
- Stefan – Boltzmann-ov zakon (1879, 1884)
- Planck-ov zakon (1900)

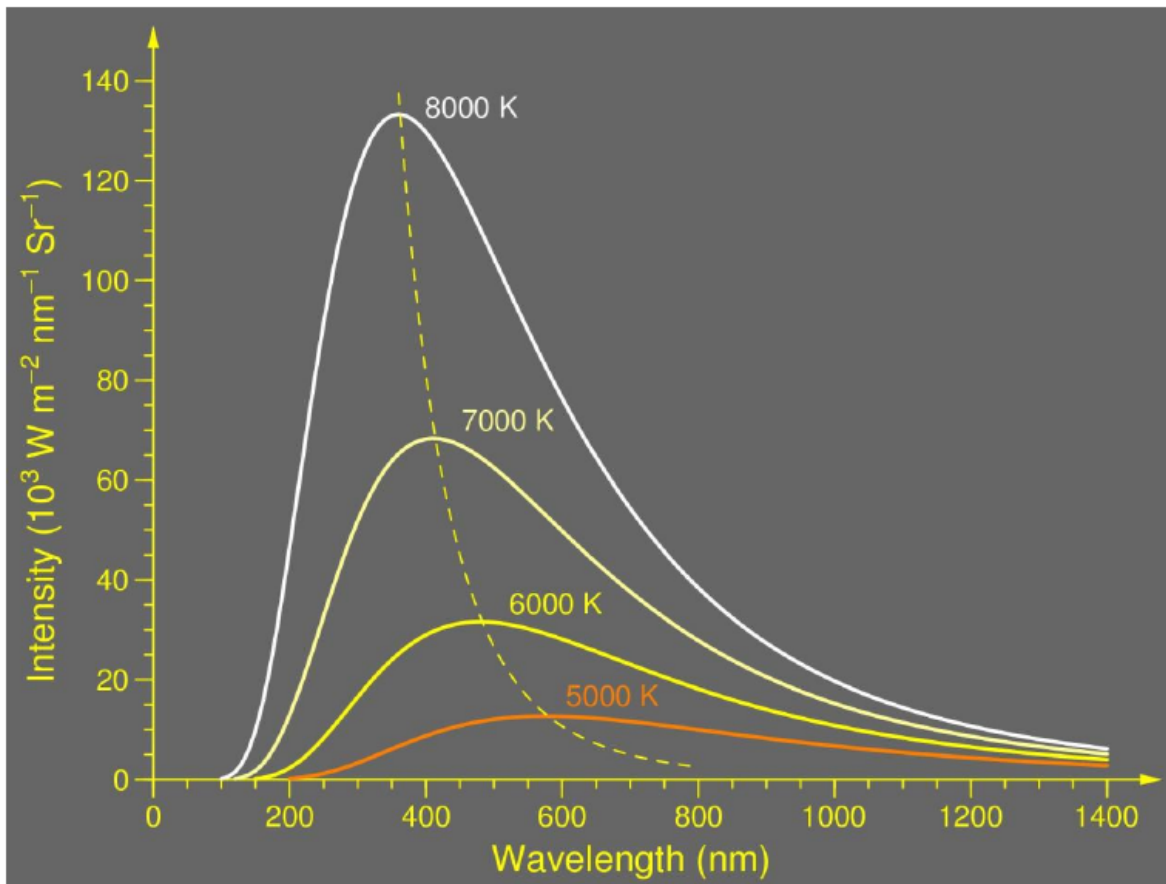
dobro opisuju neprekidni spektar zračenja zvezda

**Zračenje apsolutno crnog tela zavisi samo od njegove temperature.**



# Wien-ov zakon pomeranja (1893)

Veza izmedju boje ( $\lambda_{\max}$ ) i temperature  $T$



$$\lambda_{\max}[\text{cm}] = \frac{0.29}{T[\text{K}]}$$

$T$  - temperatura boje

Vinov zakon se može izvesti iz Plankovog zakona:

$$\left(\frac{\partial B_\nu}{\partial \nu}\right)_{\nu=\nu_{\max}} = 0$$

$$\nu_{\max} = a \cdot T$$

$$\left(\frac{\partial B_\lambda}{\partial \lambda}\right)_{\lambda=\lambda_{\max}} = 0$$

$$\lambda_{\max} \cdot T = b$$

**5800K**

$B_\lambda \rightarrow 500\text{nm}$  (zeleno)

$B_\nu \rightarrow 880\text{nm}$  (IC)

Srednja energija fotona koju emituje ACT na temperaturi T

$$\langle E_{\text{phot}} \rangle = \frac{\text{Total energy emitted}}{\text{Number of photons}} = \left( \frac{\int_0^\infty B_\nu(T) d\nu}{\int_0^\infty [B_\nu(T)/h\nu] d\nu} \right)$$

$$\langle E_{\text{phot}} \rangle = \frac{\pi^4}{30\zeta(3)} kT = (3.7294 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot T.$$

$$\lambda_{\langle E \rangle} T = 0.53265 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

920nm (IC)

# Stefan-Boltzmann-ov zakon (1879, 1884)

Ukupna količina energije zračenja koju u jedinici vremena sa jedinice površine emituje apsolutno crno telo **na svim talasnim dužinama i u svim pravcima** proporcionalna je četvrtom stepenu temperature tela:

$$F = \pi \int_0^{\infty} B_{\nu} d\nu = \sigma T^4$$

$$F = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$



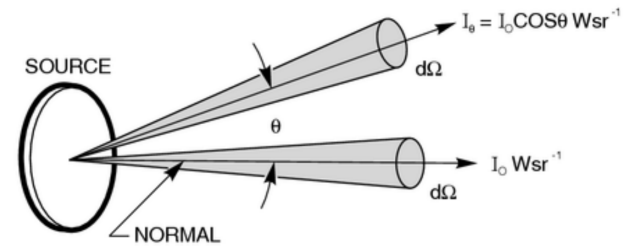
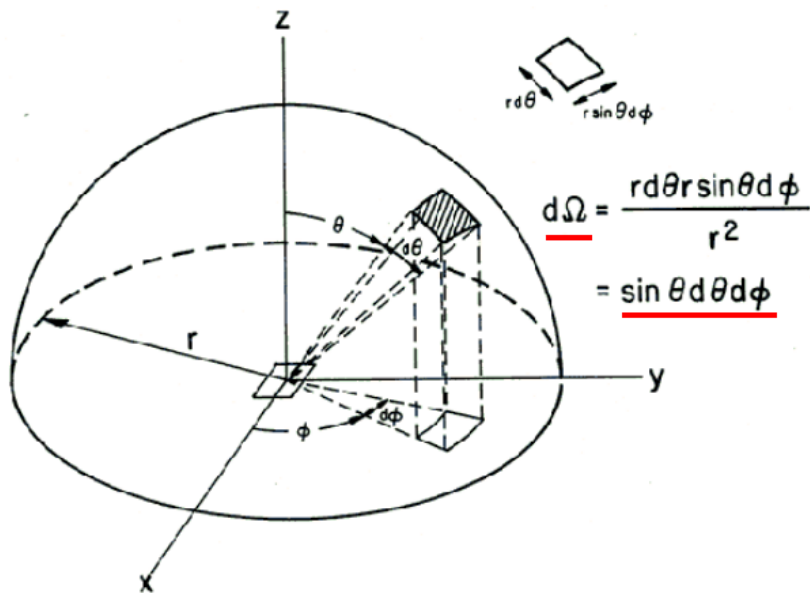
**Luminoznost** (ukupna količina energije u jedinici vremena emitovana sa cele površine):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad [\text{W}]$$

**T – efektivna**

**temperatura** = temperatura apsolutno crnog tela koje zrači istu ukupnu količinu energije sa jedinice površine u jedinici vremena kao zvezda





$$F_{\nu} = \int I_{\nu} \cos \theta d\Omega$$

$$F_{\nu} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\nu} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

koristeći smenu  $\mu = \cos \theta$

i činjenicu da je zračenje apsolutno crnog tela izotropno:

$$I_{\nu} \neq I_{\nu}(\theta)$$



$$F_{\nu} = 2\pi \int_0^1 I_{\nu} \mu d\mu = \pi I_{\nu}$$

$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$

$I_{\lambda} = \frac{dF_{\lambda}}{d\Omega}$ , TAČNOST:

$I_{\lambda} = \frac{dF_{\lambda}}{d\Omega \cos \theta}$

Ukupan broj emitovanih fotona u jedinici vremena sa jedinice površine

$$N_{\text{phot}} = \pi \int_0^{\infty} \frac{B_{\nu}}{h\nu} d\nu = (1.5205 \times 10^{15} \text{ photons m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-3}) \cdot T^3$$

Ukupna energija po jedinici vremena emitovana sa jedinice površine

$$F = N_{\text{phot}} \langle E_{\text{phot}} \rangle = (5.6704 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}) \cdot T^4$$

$$F = \pi \int_0^{\infty} B_{\nu} d\nu = \sigma T^4$$

---

## Inverzno Komptonovo rasejanje

Ako se foton energije mnogo manje od mase mirovanja elektrona rasejava na elektronu, pri čemu ne dolazi do promene energije fotona već samo do njegovog reemitovanja u drugom pravcu, takav proces se naziva **Tomsonovo rasejanje**.

Kada je energija fotona mnogo veća od mase mirovanja elektrona takva interakcija između fotona i elektrona dovešće do transfera dela energije fotona na elektron. To je **Komptonovo rasejanje**.

U astrofizičkim uslovima češće se javlja obrnut proces - **elektron visoke energije prilikom interakcije sa niskoenergetskim fotonom prenosi deo svoje energije na foton. To je inverzno Komptonovo rasejanje.**

---

---

U astrofizičkim uslovima polje zračenja koje ne može da se izbegne i koje daje najznačajniji doprinos ovakvom zračenju je polje kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja.

Bitan doprinos takođe daje i inverzno Komptonovo rasejanje o polje zvezdanog zračenja tipična za aktivna galaktička jezra i kvazare.

Dodatak: Jedna ista populacija relativističkih netermalnih elektrona proizvede sinhrotronsko zračenje, a onda ti isti elektroni izvrše inverzno Komptonovo rasejanje tih sinhrotronskih fotona i pomere ih ka još višim energijama. To je **sinhrotronska samo-komptonizacija**.

Posebno mesto u astrofizici zauzima termalno inverzno Komptonovo rasejanje mikrotalasnog pozadinskog zračenja o vreo gas unutar galaktičkih jata. To je **Sunjaev-Zeldovičev efekat**.

---

Glavni i jedini razlog zašto uopšte i imamo linijske spektre je kvantizacija energetske nivoa atoma, jona, molekula

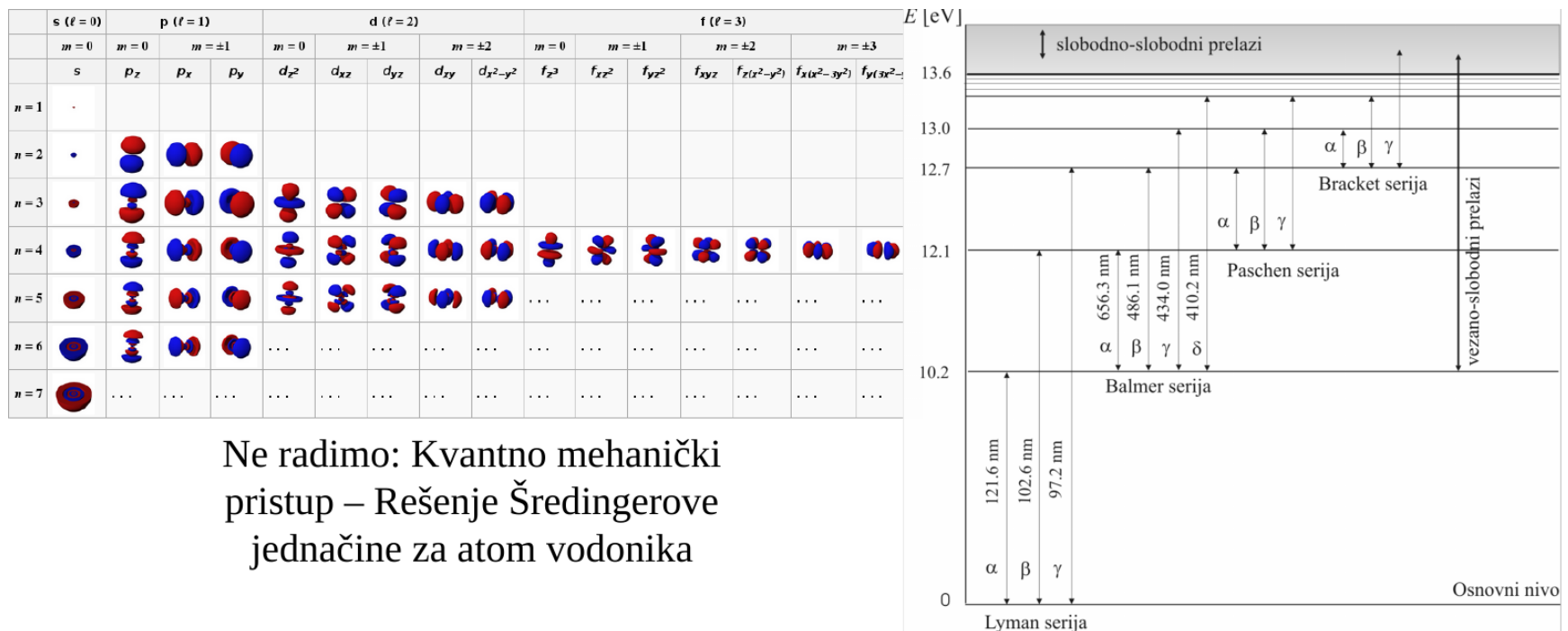
To znači da atomi, molekuli i joni, i njihove komponente mogu da budu samo u tačno određenim stanjima, gde su dozvoljene samo tačno određene energije, a ne čitav kontinuum energija – vezana stanja

Stoga pri promeni stanja dolazi do promene energije, koja može da se primi ili oslobodi u vidu zračenja

Zbog kvantizacije energetske nivo ta promena energije nije proizvoljna već uzima tačno određenu vrednost jednaku razlici početnog i krajnjeg energetske stanja, te zbog toga i emitovano tj. apsorbovano zračenje ima tačno određene talasne dužine, tj. vidi se kao linija u spektru

Talasne dužine linija koje se vide usled različitih prelaza su precizno određene ili iz kvantnomehaničkih proračuna ili na osnovu laboratorijskih merenja

Borov model atoma vodonika je odavno prevaziđen ali mi koristimo samo tu terminologiju radi jednostavnosti izlaganja



Ne radimo: Kvantno mehanički pristup – Rešenje Šredingerove jednačine za atom vodonika

Energetski nivoi atoma vodonika, naivni model!!! – u svemiru najviše vodonika

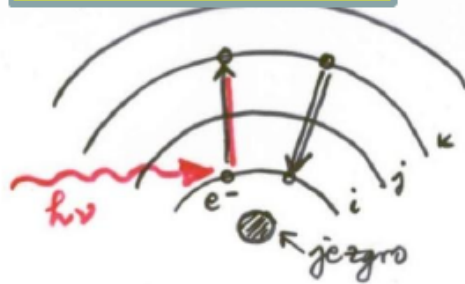
Notacija: HI (neutralan H), HII (jonizovan H, proton), H<sub>2</sub> (molekulski H), HeI, HeII, HeIII,...

Atomske procese koji rezultuju formiranjem linijskih spektara možemo podeliti na vezano-vezane i vezano-slobodne

U vezano-vezanim prelazima elektron prelazi iz jednog vezanog stanja unutar atoma u drugo vezano stanje, dok kod vezano-slobodnih prelaza imamo situaciju gde slobodan elektron prelazi u vezano stanje unutar atoma (rekombinacija) ili obrnuto (jonizacija)

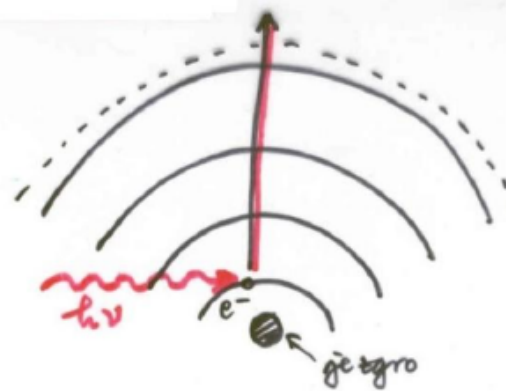
U odnosu na način na koji dolazi do vezano-vezanih procesa, možemo ih podeliti u dve grupe, na radijativne procese gde je promena energetske stanja elektrona izazvana apsorpcijom zračenja, i na sudarne procese gde se energija razmenjuje usled sudara

## Apsorpcija



$$h\nu = E_k - E_i$$

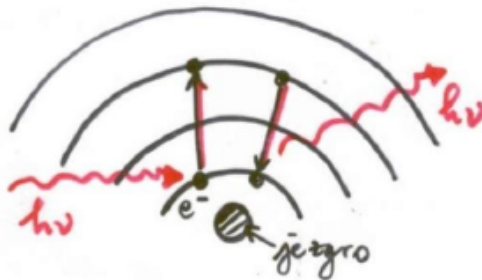
- fotoekscitacija praćena sudarnom deekscitacijom



$$h\nu = E_{\text{ioniz}} + \frac{1}{2}mv^2$$

- fotojonizacija

## Rasejanje



- apsorbovani foton atomom reemitovan je u nekom drugom pravcu

- rasejanje na molekulima - Rayleighevo :  $1/\lambda^4$

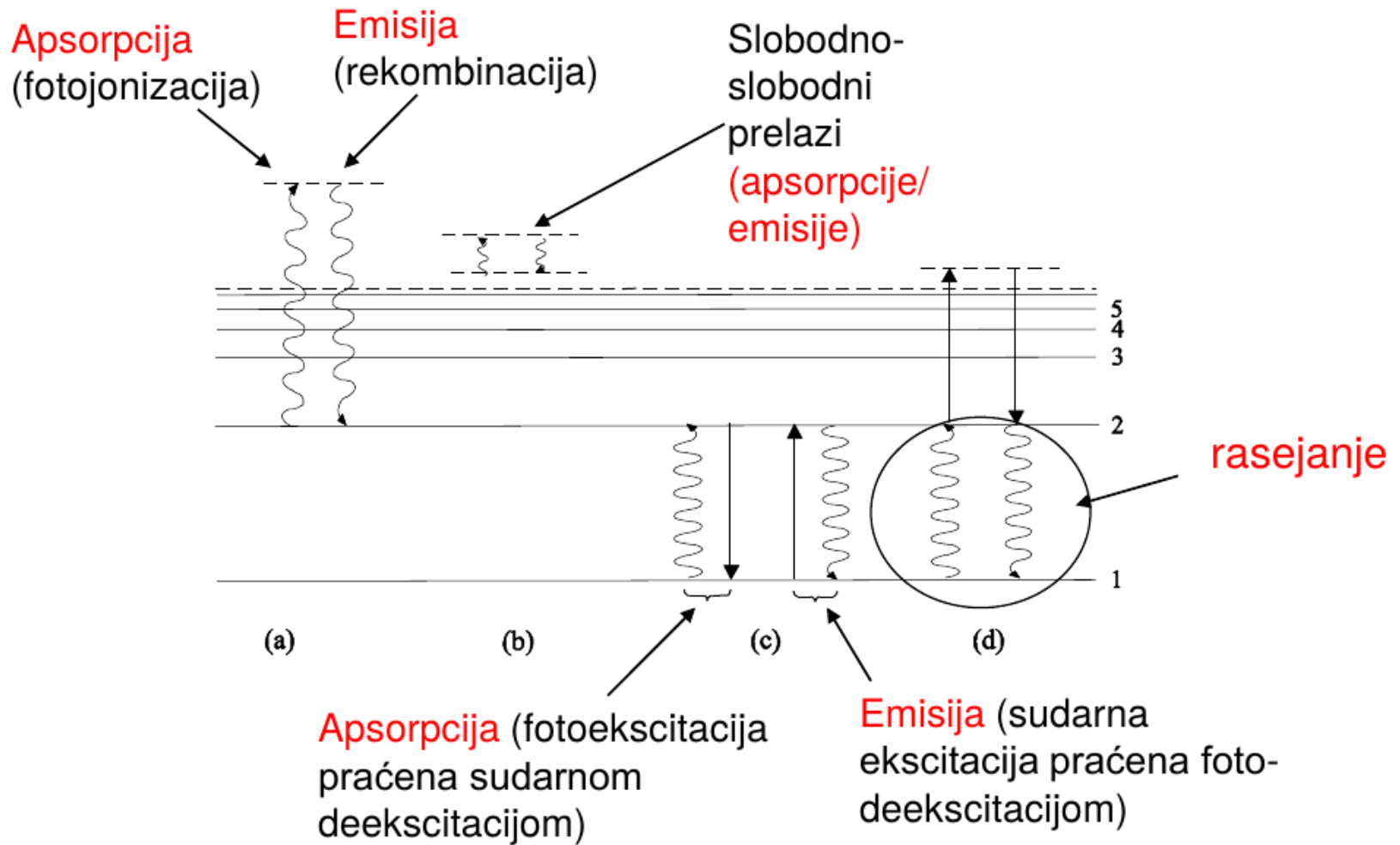
- rasejanje na slobodnim elektronima – Tomsonovo  $\neq f(\lambda)$

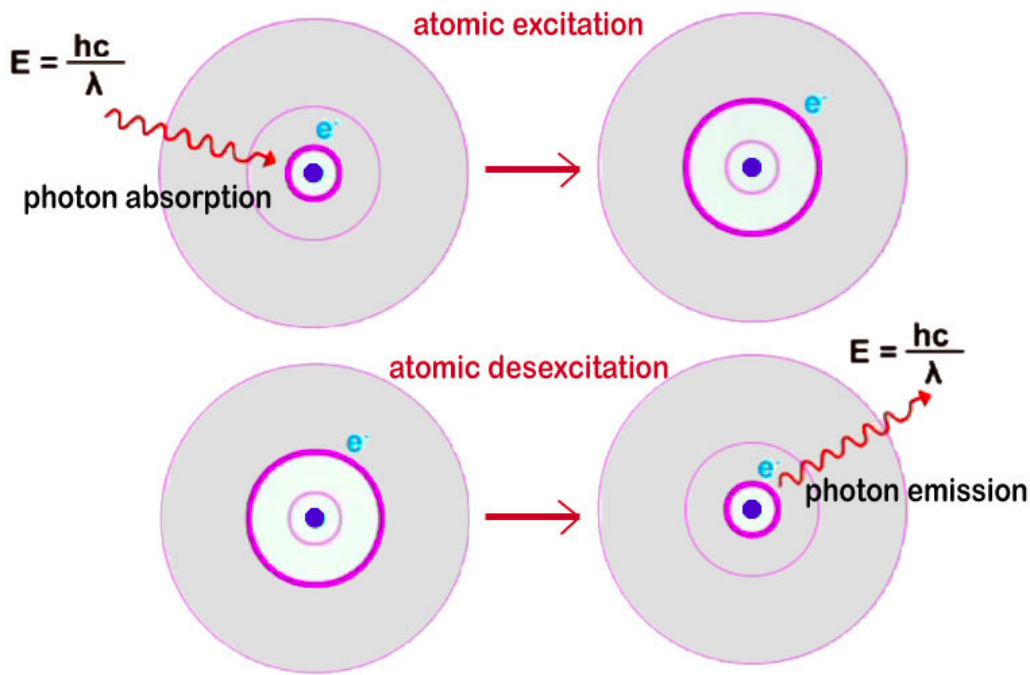


Tri osnovna procesa:

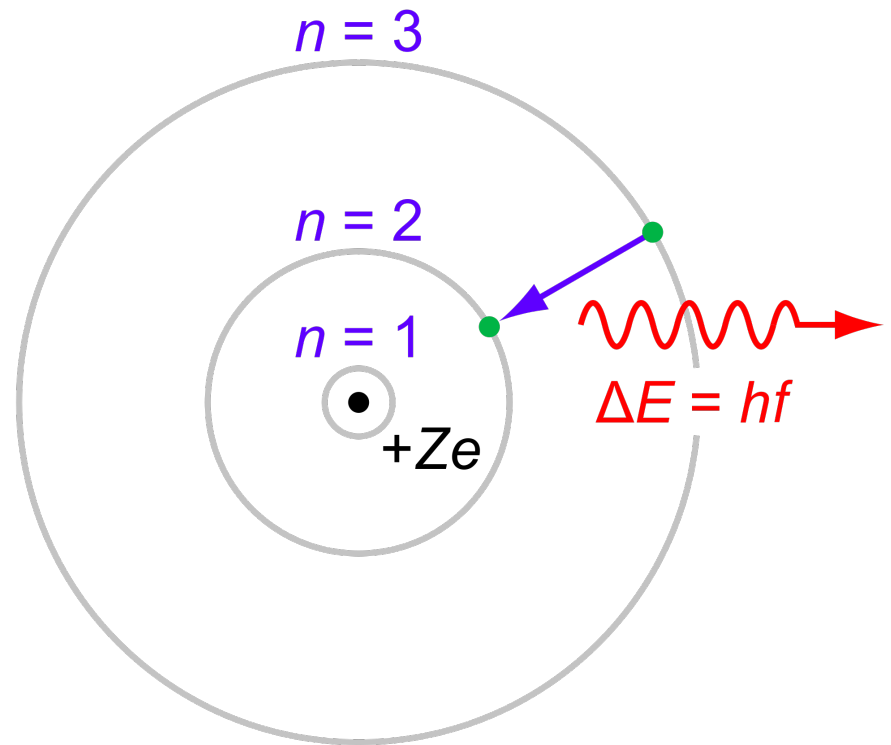
## apsorpcija, emisija i rasejanje

Primeri:





© Astronoo.com



Fotoekscitacija, sudarna ekscitacija, fotojonizacija, sudarna jonizacija, radijativna deekscitacija, sudarna deekscitacija, rekombinacije

# Elektromagnetno zračenje

- Prava apsorpcija i rasejanje svetlosti – **interakcija zračenja sa materijom**  
transformacija elektromagnetne energije u unutrašnju energiju gasa/plazme ili promena pravca prostiranja fotona (posmatrajući jedan pravac deluje da se menja količina energije u jedinici vremena)
- Prelaz elektrona iz nižeg u više energetske stanje ostvaren pod dejstvom zračenja naziva se fotoekscitacija (apsorpcija na rezonantnoj frekvenciji)
- Za zračenje se kaže da je pravo apsorbovano ako se povratak elektrona iz višeg u niže energetske stanje vrši bez reemisije zračenja, kada atom višak svoje unutrašnje energije preda u sudaru drugoj čestici (sudarna deekscitacija) – dolazi do transformacije em energije u unutrašnju energiju gasa
- Moguća je i apsorpcija zračenja koja dovodi do prelaza elektrona iz vezanog u slobodno stanje (fotojonizacija) – suprotan proces zahvata slobodnog elektrona je rekombinacija

Rasejanje predstavlja proces pri kome zračenje kroz interakcije sa česticama sredine uglavnom samo menja pravac svog prostiranja, i, eventualno, ali vrlo malo, i frekvenciju (talasnu dužinu)

Za razliku od pravo apsorbovanog, rasejano zračenje nije izgubljeno iz ukupnog polja zračenja (tj. njegova energija nije pretvorena u termalnu energiju čestica gasa), ali je izgubljeno u datom pravcu

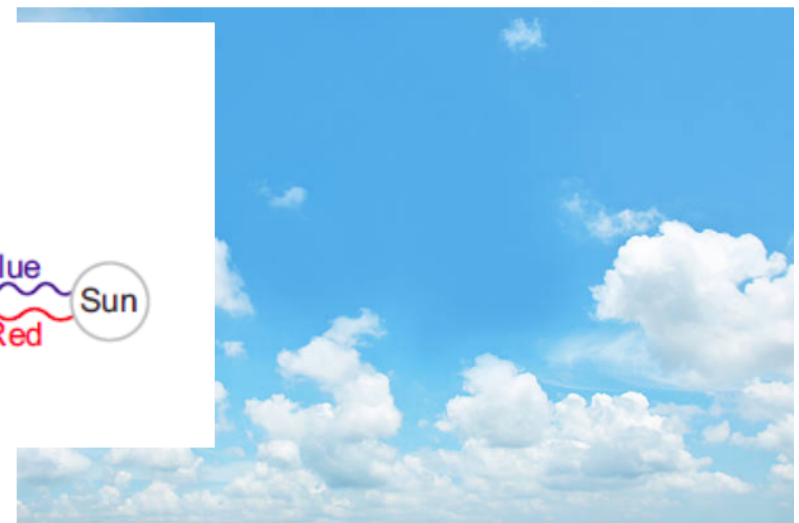
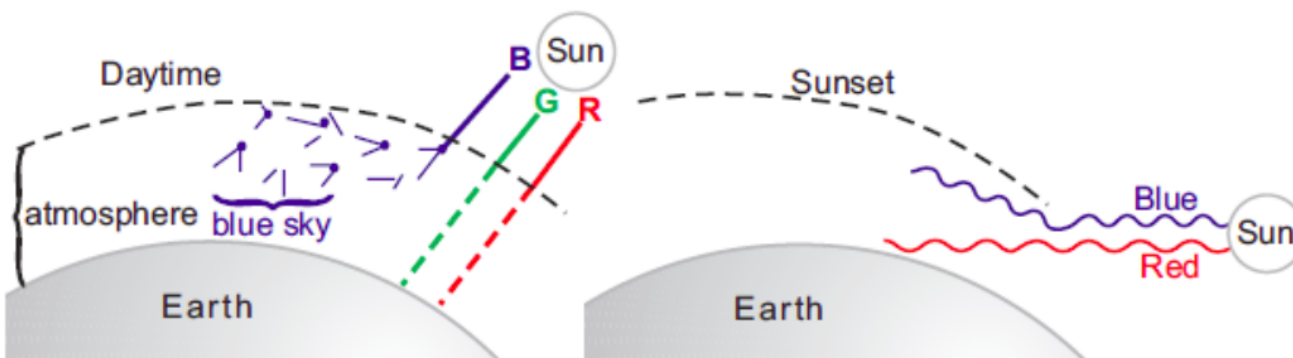
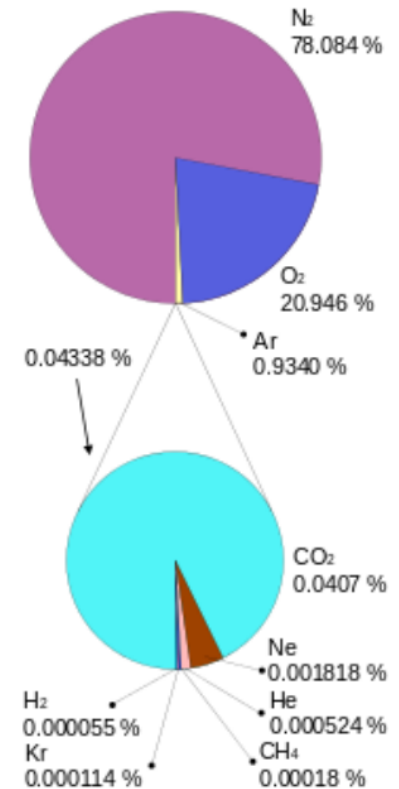
Rasejanje na molekulima i atomima poznato je kao Rejlijevo – Intenzitet tako rasejanog zračenja je obrnuto proporcionalan četvrtom stepenu talasne dužine

Rasejanje na slobodnim elektronima se naziva Tomsonovo (Thomson) – Ono ne zavisi od talasne dužine

- Uticaj sredine na prostiranje elektromagnetnog zračenja
- Sastav Zemljine atmosfere
- Zašto je nebo plavo, a oblaci često beličasti?

Kao posledica **Rejljevog rasejanja**, u Zemljinoj atmosferi je najviše rasejana Sunčeva svetlost kraćih talasnih dužina (plava) što daje nebu plavu boju – Kada se posmatraju objekti blizu horizonta njihovo zračenje prolazi duži put kroz donje, gušće slojeve atmosfere tako da, kao posledica rasejanja, ovi objekti izgledaju crveniji (npr. Mesec kada je blizu horizonta)

U oblacima je svetlost rasejana vodenim kondenzacijama – za razliku od rasejanja na molekulima u atmosferi, veličina kapljica vode u oblacima je istog reda veličine kao i vidljivi fotoni, pa do izražaja dolazi **Miovo rasejanje** koje skoro pa izortopno rasejava!!!



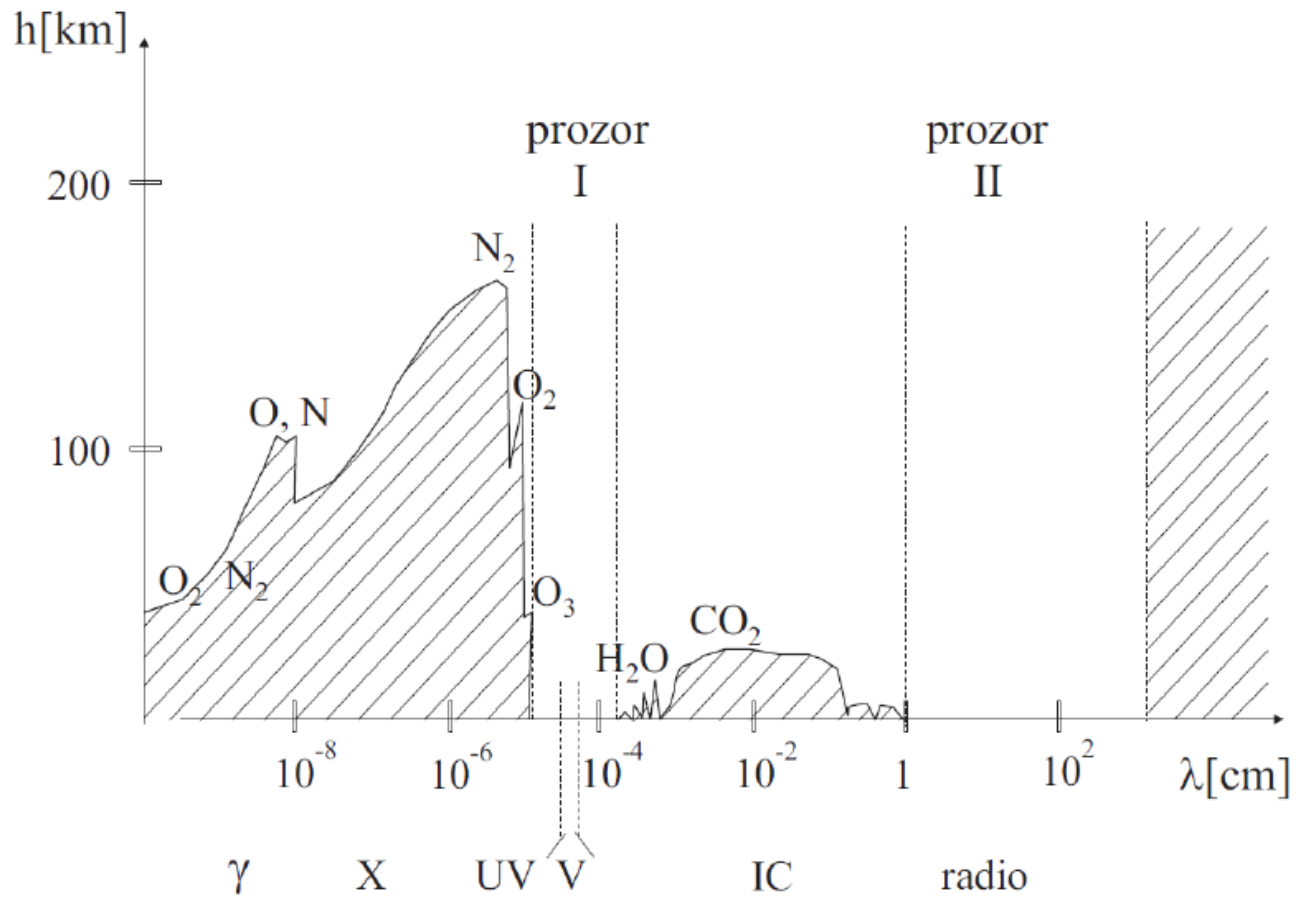
# Uticaj Zemljine atmosfere na astronomska posmatranja

1.Refrakcija (prelamanje)

2.Scintilacija (treperenje)

3.Ekstinkcija (slabljenje)

# (Ne)prozračnost Zemljine atmosfere

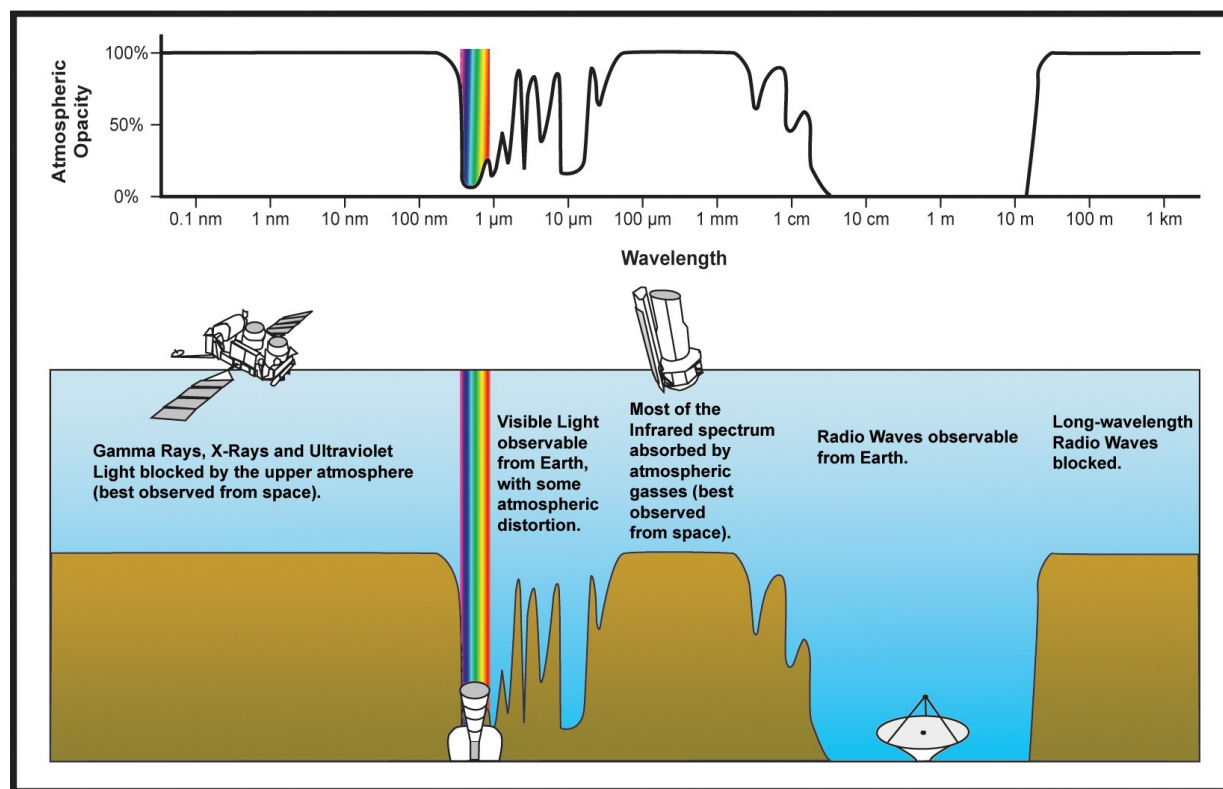


**I prozor:  $300 \text{ nm} < \lambda < 1200 \text{ nm}$**

**II prozor:  $1 \text{ cm} < \lambda < 15 - 20 \text{ m}$**

- 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)

+ kontaminacija zvezdanog spektra apsorpcionim linijama koje nastaju u Zemljinoj atmosferi, a nekada i emisija

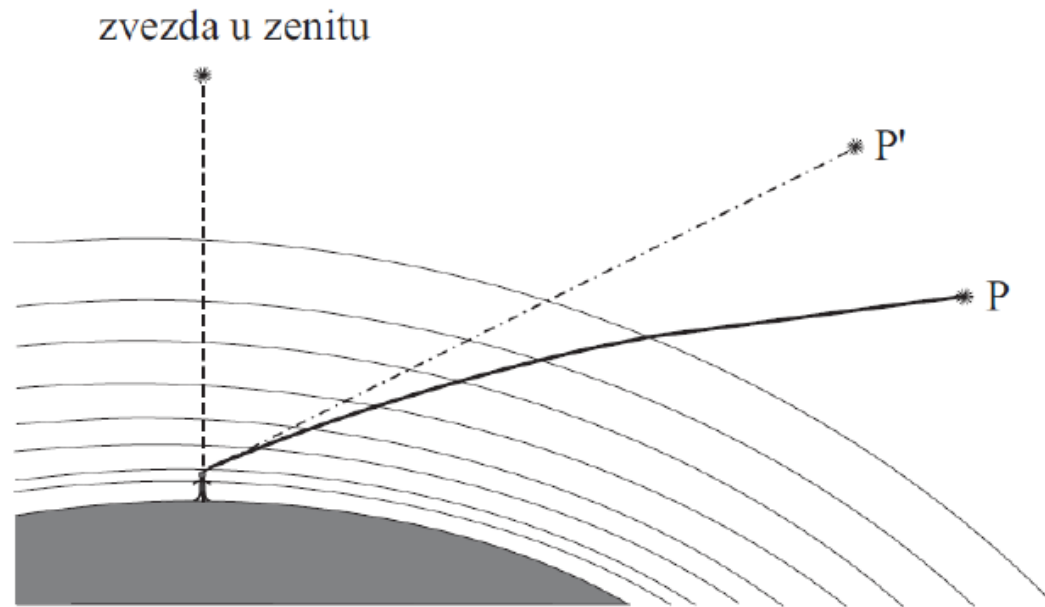




Zračenje nebeskih tela (zvezda, maglina, galaksija) na svom putu do nas prolazi ogroman prostor (međugalaktički, međuzvezdani i međuplanetski) koji je ispunjen materijom tako male gustine da se može smatrati vakuumom. Zbog toga se svetlosni zrak sve do gornje granice Zemljine atmosfere prostire pravolinijski. Pro-laskom kroz atmosferu koja je nehomogena, nestacionarna i znatne gustine, ovo zračenje trpi niz promena.

Za astronoma je vrlo značajno da poznaje one pojave u Zemljinoj atmosferi koje menjaju karakter zračenja nebeskih tela. Ovde ćemo ukratko opisati pojave koje najviše utiču na astronomska posmatranja. To su **refrakcija** (prelamanje), **scintilacija** (treperenje) i **ekstinkcija** (slabljenje). Zbog refrakcije svetlosti u atmosferi, mereni položaj nebeskog tela (određen pravcem vizure posmatrača na Zemlji) ne poklapa se sa položajem nebeskog tela van atmosfere. Nehomogenost vazduha i turbulencija u Zemljinoj atmosferi kvare (pomeraju i deformišu) likove posmatranih objekata. I, najzad, rasejanje i apsorpcija zračenja u atmosferi slabe (redukuju) sjaj posmatranih nebeskih tela.

# 1. Refrakcija (prelamanje)



$$\rho(h) = \rho(0)e^{-h/H}$$

Produžena obdanica – zora i suton

Spljošteni diskovi Sunca i Meseca blizu horizonta

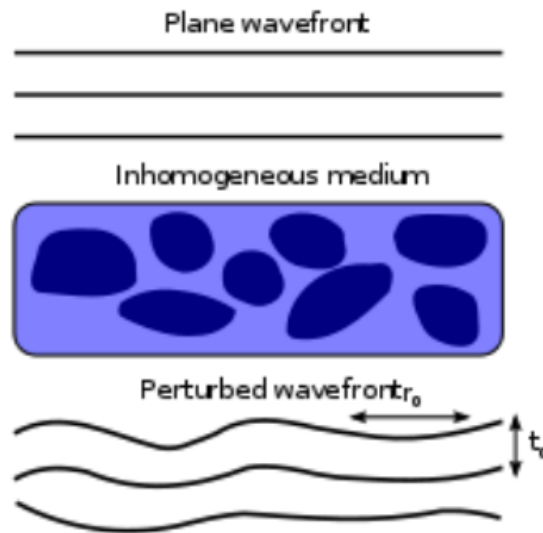
$$n_k \sin i_k = n_{k+1} \sin i_{k+1}$$

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = \dots = n_N \sin i_N$$

$n_1 < n_2 < \dots < n_N$   $\Rightarrow$  **refrakcija prividno izdiže objekte iznad horizonta**

$n = n(x, y, z, t, \lambda)$  **disperzija**

## 2. Scintilacija, kretanje/igranje lika, zamrljanost



### Deformacije ravnog talasnog fronta na nehomogenostima u Zemljinoj atmosferi

Zbog prolaska svetlosnog talasa kroz turbulentnu (nehomogenu i nestacionarnu) Zemljinu atmosferu u vidnom polju teleskopa javljaju se:

- **Scintilacija** (treperenje) - brze i haotične promene sjaja zvezde - posledica su **fluktuacije amplitude** svetlosnog talasa
- **Image motion** (kretanje/igranje lika) u vidnom polju teleskopa – posledica je **fluktuacije nagiba talasnog fronta**
- **Blurring** (zamrljanost lika) – posledica je **fluktuacije faze** svetlosnog talasa

Svaka nehomogenost u atmosferi se ponaša kao optičko sočivo

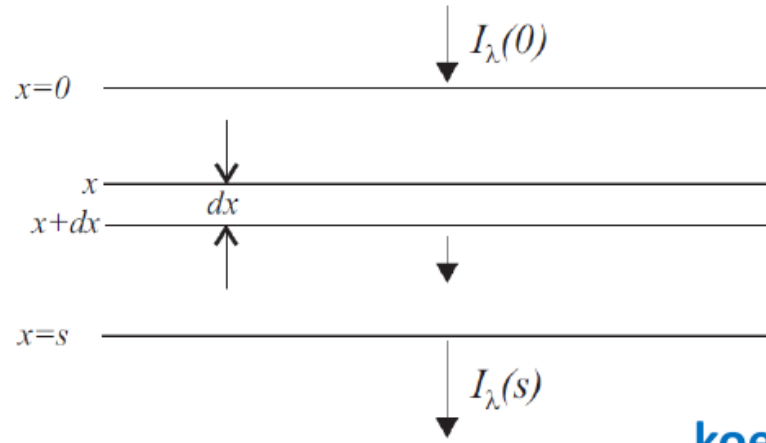
Ravan talasni front se deformiše usled fluktuacija indeksa prelamanja, koje nastaju zbog promene temperature i gustine u nehomogenostima

Fluktuacija amplitude svetlosnog talasa – brze promene sjaja (treperenje, scintilacija)

Zvezde (tačkasti izvori) trepere

### 3. Ekstinkcija (slabljenje) zračenja

## Ekstinkcija (makroskopski opis)



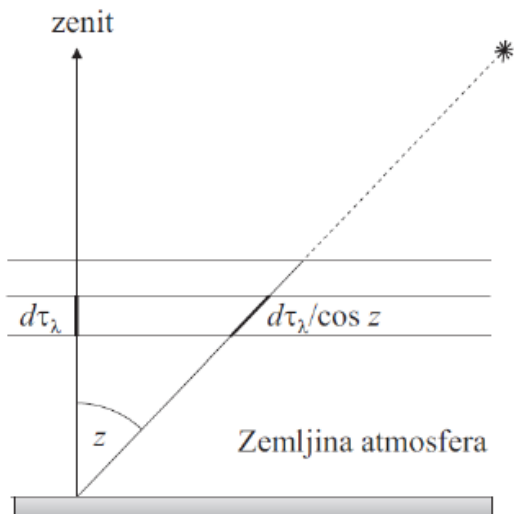
koeficijent ekstinkcije

$$-dI_\lambda = \kappa_\lambda(x) \rho(x) I_\lambda(x) dx$$

$$I_\lambda(s) = I_\lambda(0) e^{-\int_0^s \kappa_\lambda(x) \rho(x) dx} = I_\lambda(0) e^{-\tau_\lambda}$$

$$\tau_\lambda = \int_0^s \kappa_\lambda(x) \rho(x) dx$$

optička dubina



$$I_\lambda(\tau_\lambda) = I_\lambda(0) e^{-\tau_\lambda / \cos z}$$

