

Odabrana poglavlja astronomije - Lekcije 6-7: Elektromagnetno Zračenje Nebeskih Tela.

Dragana Ilić (MATF)

09/11/2023



O čemu smo pričali do sada:

- Gde prividno vidimo nebeska tela i kako da im odredimo koordinate (koordinatni sistemi).
- Kako se ta tela prividno kreću po nebeskoj sferi (sistemi vremena)
- Zašto se u stvari ta tela kreću (Gravitaciona interakcija i Keplerovi zakoni)
- Danas pričamo o tome šta mi u stvari vidimo!**
- Razlog što možemo da posmatramo nebeska tela je što ta tela emituju (ili reflektuju, ili rasipaju) neku svetlost, odnosno EM zračenje.
- Danas:** Šta je svetlost kako nastaje i kako da je objasnimo i opišemo zračenje nebeskih tela!

Za početak – Kako nastaje svetlost u svetu oko nas?

•Tj. zašto uopšte vidimo to što vidimo

Za početak – Kako nastaje svetlost u svetu oko nas?

- Vatra – hemijska energija u svetlosnu
- Neonke i LED lampe - električna energija u svetlosnu
- Obične sijalice od wolframa - električna u toplotnu, pa u svetlosnu
- Ljudi i predmeti oko nas – refleksija dnevne i veštačke svetlosti
- Sunce – ???
- Planete - ???
- Radio signali, X zračenje, Gama zračenje, itd. itd.
- Radioaktivni raspad – jeste zračenje, ali nije svetlost!

Svetlost = EM zračenje

- Klasično gledano – svetlost je talas
- Talas je putujuća perturbacija

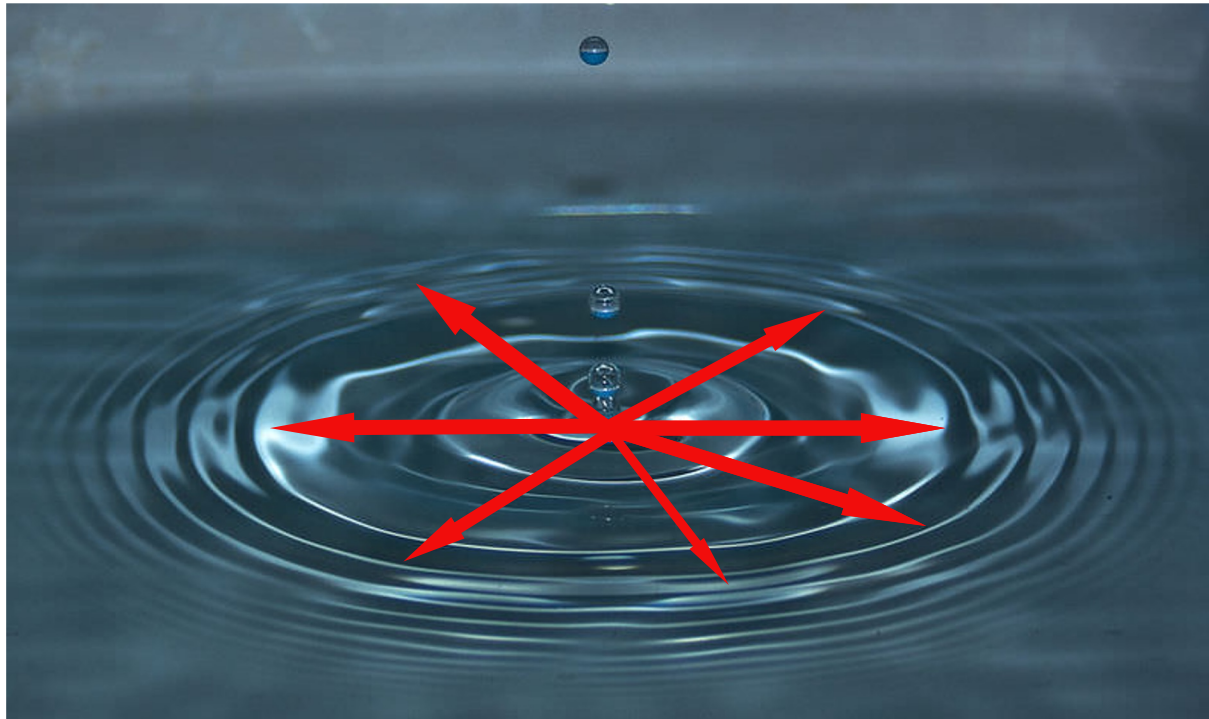


- Kako su nastali ovi talasi? Kako putuje perturbacija?

Talasi

- Perturbacija nastaje u centru i putuje ka spolja
- Energija se transportuje u istom pravcu

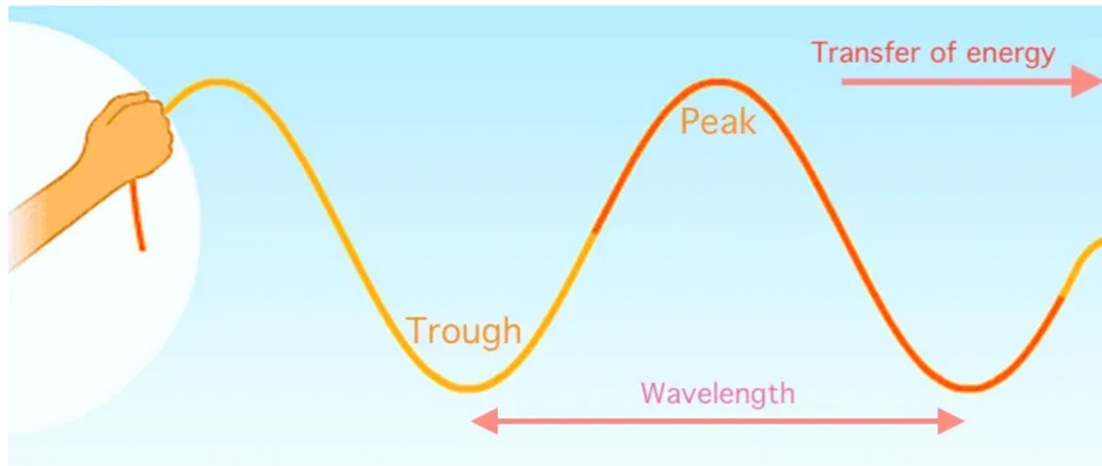

Prostiranje energije



- Ovo je primer tzv **2D** talasa, gde se perturbacija prostire u treću dimenziju.
- Ovo je takodje **transverzalan** talas, znači da je perturbacija normalna na pravac prostiranja.

Jednostavnije – 1D talasi

- Talas se prostire duž jedne ose, perturbacija normalno na pravac prostiranja.



- Talas ne mora da bude harmonijska funkcija. Mi uvek crtamo talase kao neke sinuse i kosinuse, **ali svaka funkcija koja ispunjava:**

$$f(x, t) = g(x - vt)$$

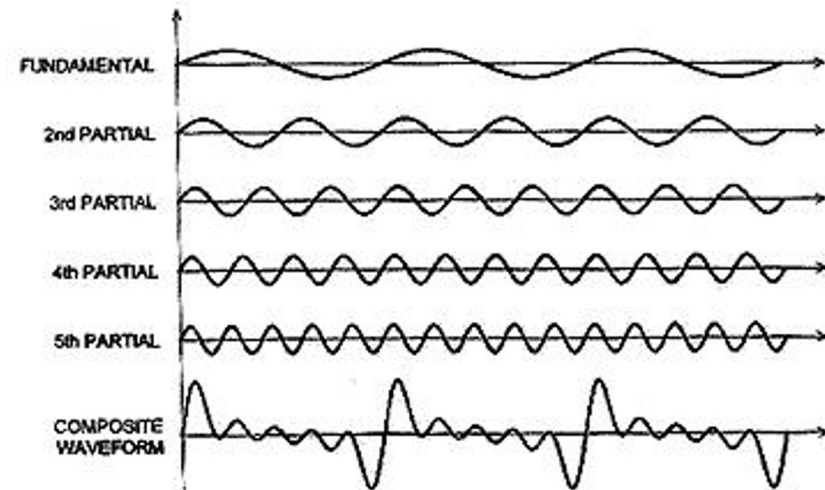
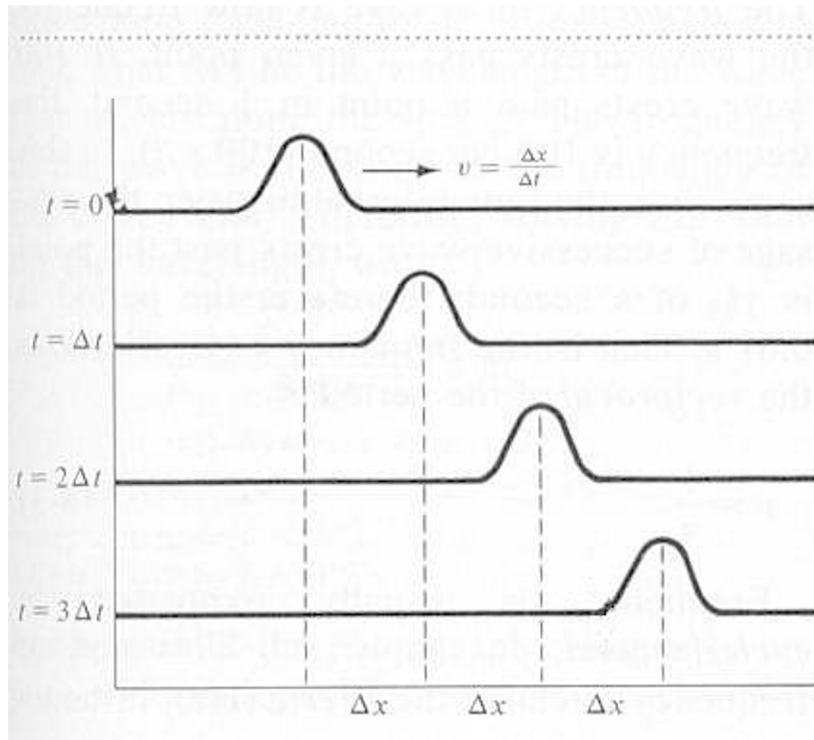
... je talas, gde **g** može da bude bilo koja diferencijabilna funkcija.

1D talasi

- Fizički, talasi se pojavljuju kada se sredina kroz koju se talas prostire ponaša u skladu sa talasnom jednačinom:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

- I ovo su talasi:

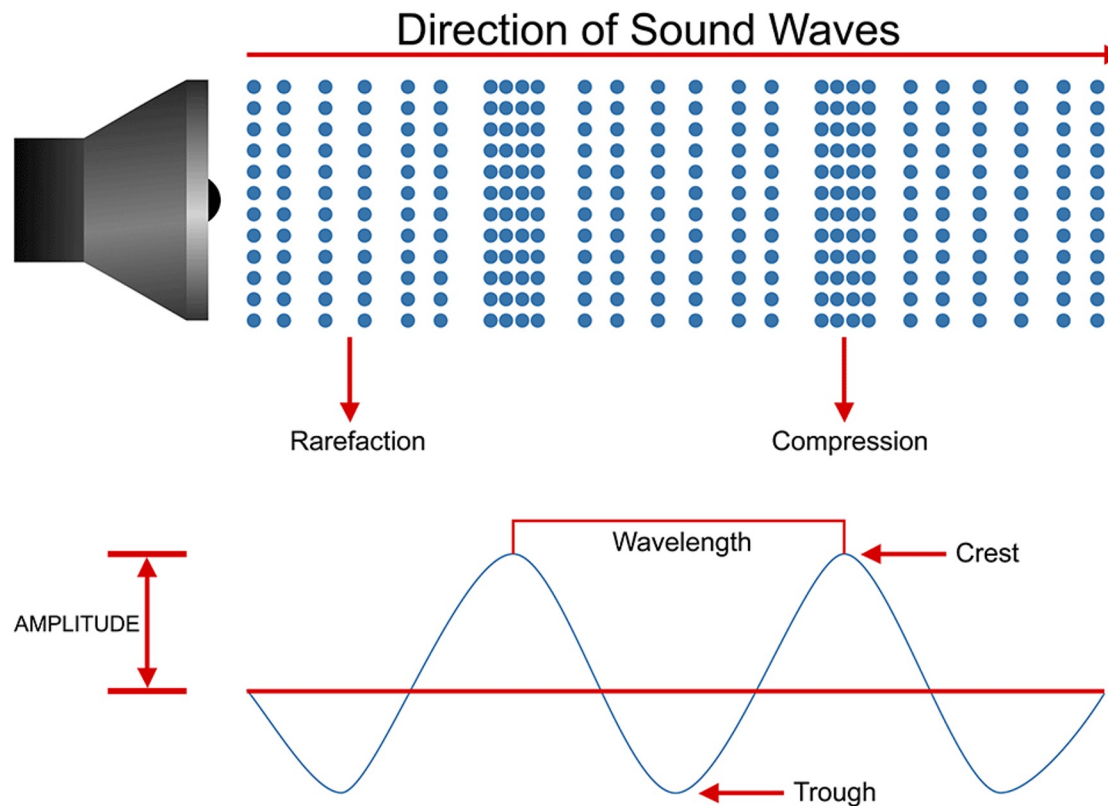


Obratite pažnju:

•Čak i u 1D, talas je 2D funkcija (x, t)

•“Perturbacija” ne mora da znači da se čestice “podižu i spuštaju”, možemo da imamo bilo kakav poremećaj bilo koje fizičke veličine

•Npr. zvuk je **longitudinalan talas**. U pitanju je prostiranje perturbacije u pritisku/gustini:



Šta je onda svetlost?

•Svetlost je prostiranje poremećaja u električnom i magnetnom polju:
Elektro-Magnetni (EM) talas

•Teorijsko opravdanje za postojanje ovih talasa dato je **Maksvelovim jednačinama:**

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Nema izvora električnog i magnetnog polja!

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Promenljivo magnetno polje **indukuje** električno polje

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Promenljivo električno polje **indukuje** magnetno polje

Brzina prostiranja talasa

Harmonijski ravni talasi

- **Prvo**, fokusiramo se na električno polje, magnetno polje je **normalno** na električno i ima istu vremensku i prostornu zavisnost.
- Svaki talas je rešenje Maksvelovih jednačina.
- Specifična rešenja slede iz graničnih uslova (**tj. od prirode izvora**).
- Zanimaju nas harmonijski ravni talasi, pošto svaki drugi talas možemo da razložimo na harmonijske ravne talase (npr. Furijeovom transformacijom).
- Oni imaju ovakav oblik:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

Harmonijski ravni talasi

•Obično orijentišemo koordinatni sistem tako da se talas prostire duž z ose:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

Ugaona frekvencija

Talasni broj

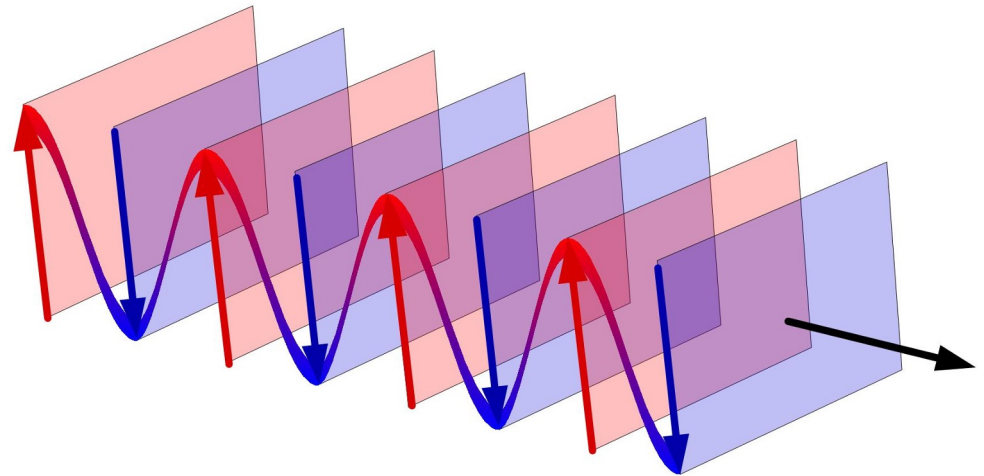
Amplituda (vektor)

•Ovde je: $k = \frac{2\pi}{\lambda}; \omega = 2\pi\nu$

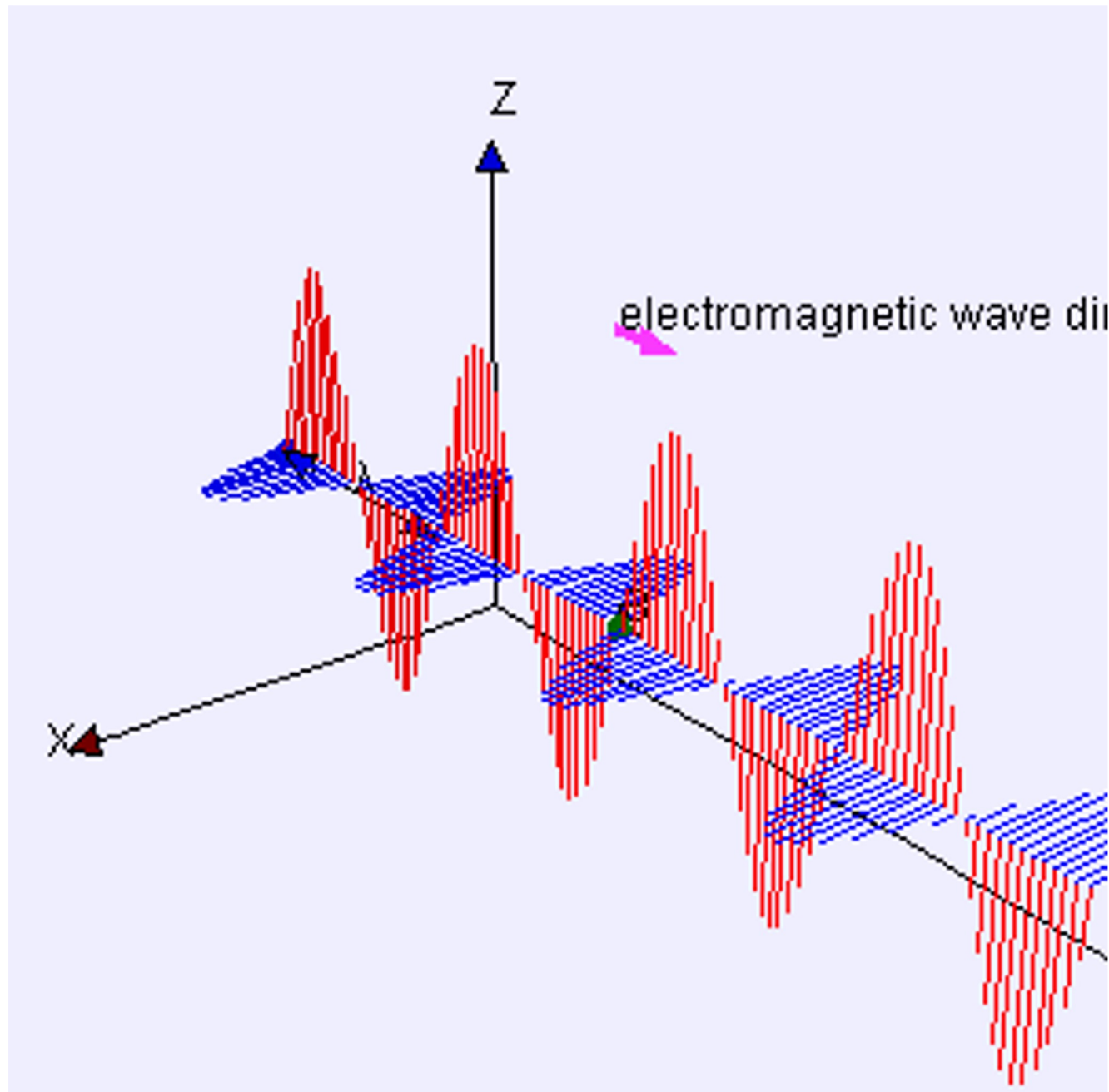
Frekvencija

Talasna dužina

$$c = \lambda\nu = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = \text{const}$$

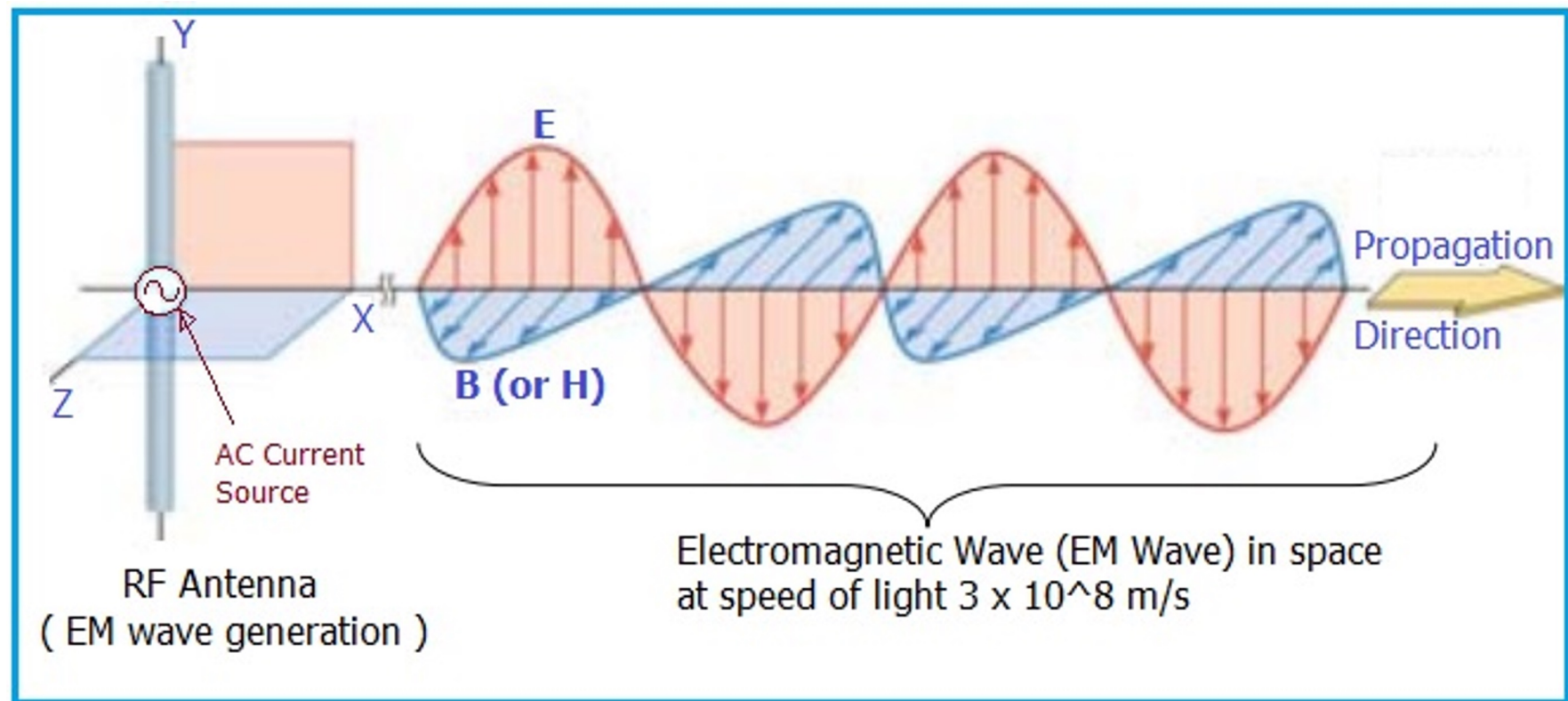


Harmonijski ravni talasi



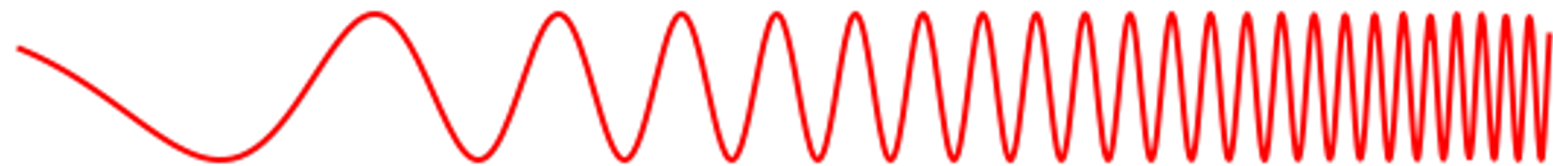
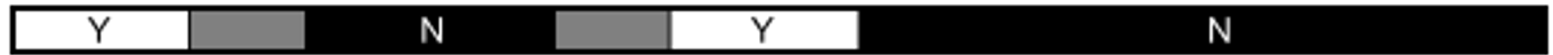
Najjednostavniji primer generatora EM talasa – antena!

- Kretanje naelektrisanih čestica prouzrokuje EM talase. Radio zračenje je takodje svetlost! (Naravno, ne vidljiva).
- Videćemo da se svi izvori svetlosti mogu predstaviti kao neko kretanje (oscilacije) naelektrisanih čestica!

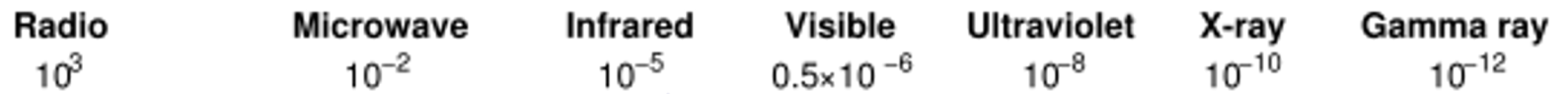


Spektar EM zračenja

Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type
Wavelength (m)

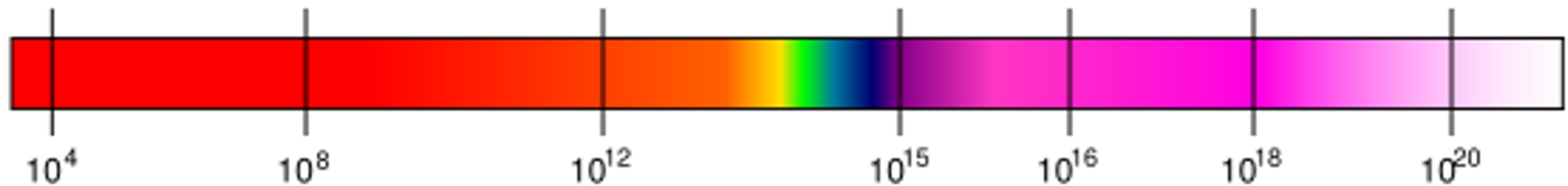


Approximate Scale of Wavelength

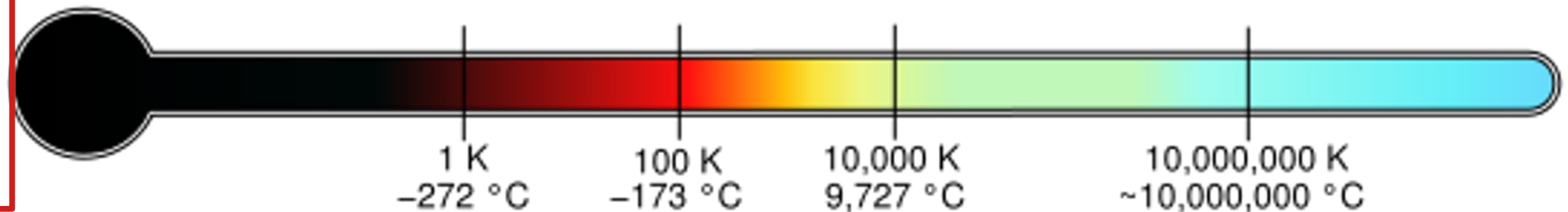


Buildings Humans Butterflies Needle Point Protozoans Molecules Atoms Atomic Nuclei

Frequency (Hz)



Temperature of objects at which this radiation is the most intense wavelength emitted



Drugi način da reprezentujemo svetlost – fotoni!

•Svetlost se može predstaviti kao “snop” čestica. Te čestice zovemo **fotoni**

•Svaki foton ima energiju direktno srazmernu frekvenciji:

$$E = h\nu$$

•Fotoni nemaju masu i kreću se (naravno!) brzinom svetlosti

•Fotoni su jedna od reprezentacije tzv. dualne prirode svetlosti (svetlost je **i talas i čestica**).

•Možemo da kažemo da sijalica emituje EM talase, a možemo da kažemo i da emituje fotone.

•U različitim fenomenima se manifestuju različiti aspekti prirode svetlosti.

•Generalna teorija se zove **kvantna elektrodinamika** i njom se nećemo baviti :)



Umetnički prikaz

Spektri nebeskih tela:

Šta za vas, u svakodnevnom životu, predstavlja reč **spektar**?

Spektri nebeskih tela:

Šta za vas, u svakodnevnom životu, predstavlja reč **spektar**?

- “Širok spektar ponude”
- “Čitav spektar različitih proizvoda”
- “Uzak spektar zanimanja”
- Spektar matrice
- Spektralni metodi za rešavanje diferencijalnih jednačina
- Desno: ZX spectrum**, jedan od prvih personalnih računara (nema veze sa astronomijom)
- Spektar: skup, raspodela....



Spektar nebeskih tela

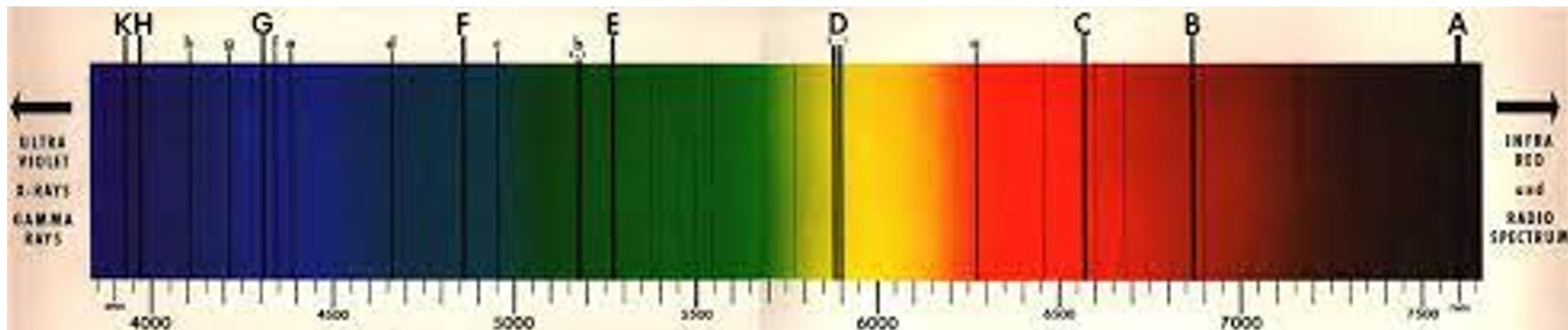
•Ako zračenje koje dobijamo predstavimo kao skup **harmonijskih ravnih talasa** različitih talasnih dužina, gde svaka talasna dužina nosi neku količinu energije, spektar je funkcija raspodele:

$$E(\lambda) = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{hc}{\lambda}$$

Energija jednog
fotona date
talasne dužine

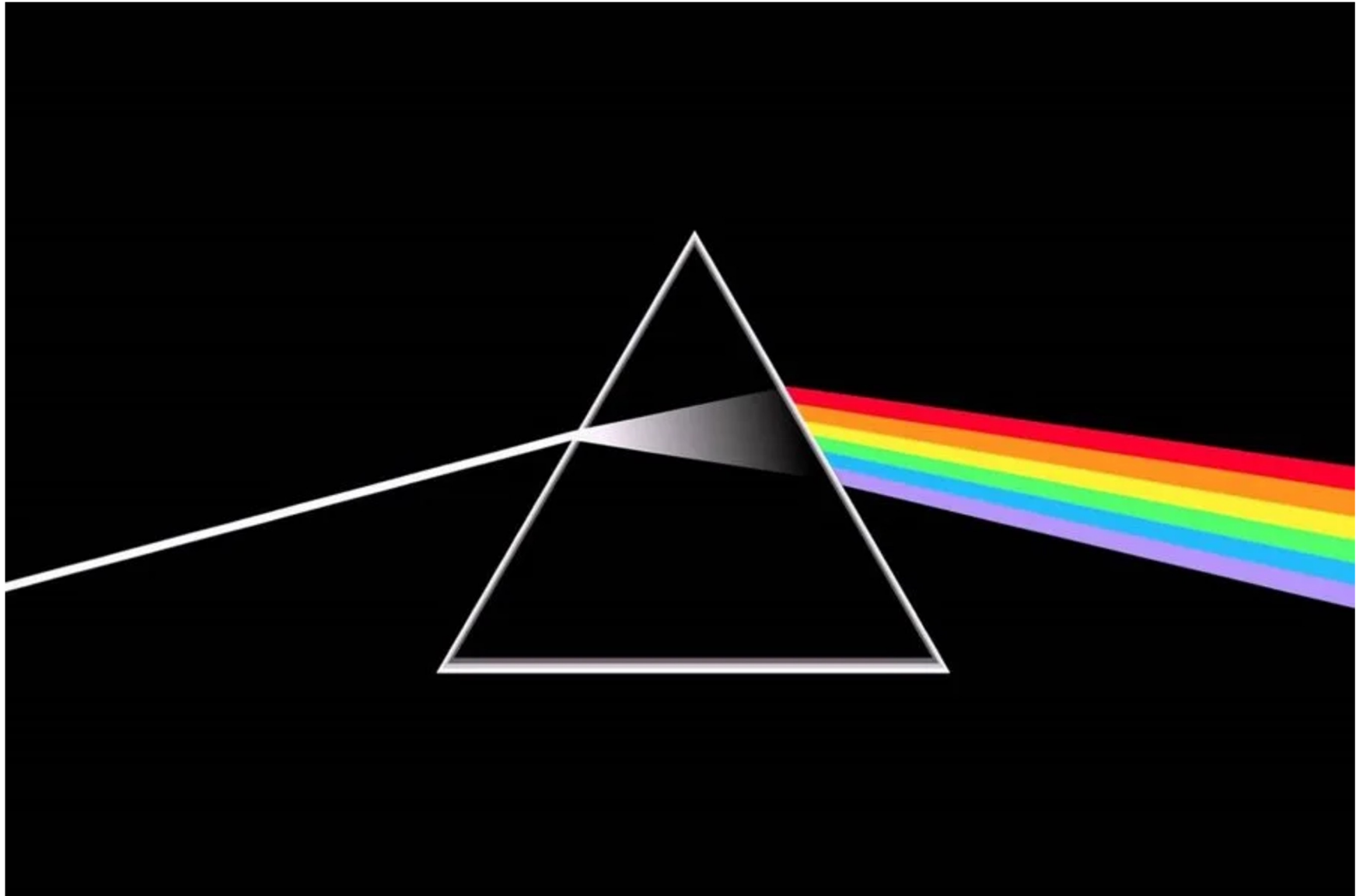
•Ukupna energija primljena na nekom intervalu je onda:

$$\Delta E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda$$

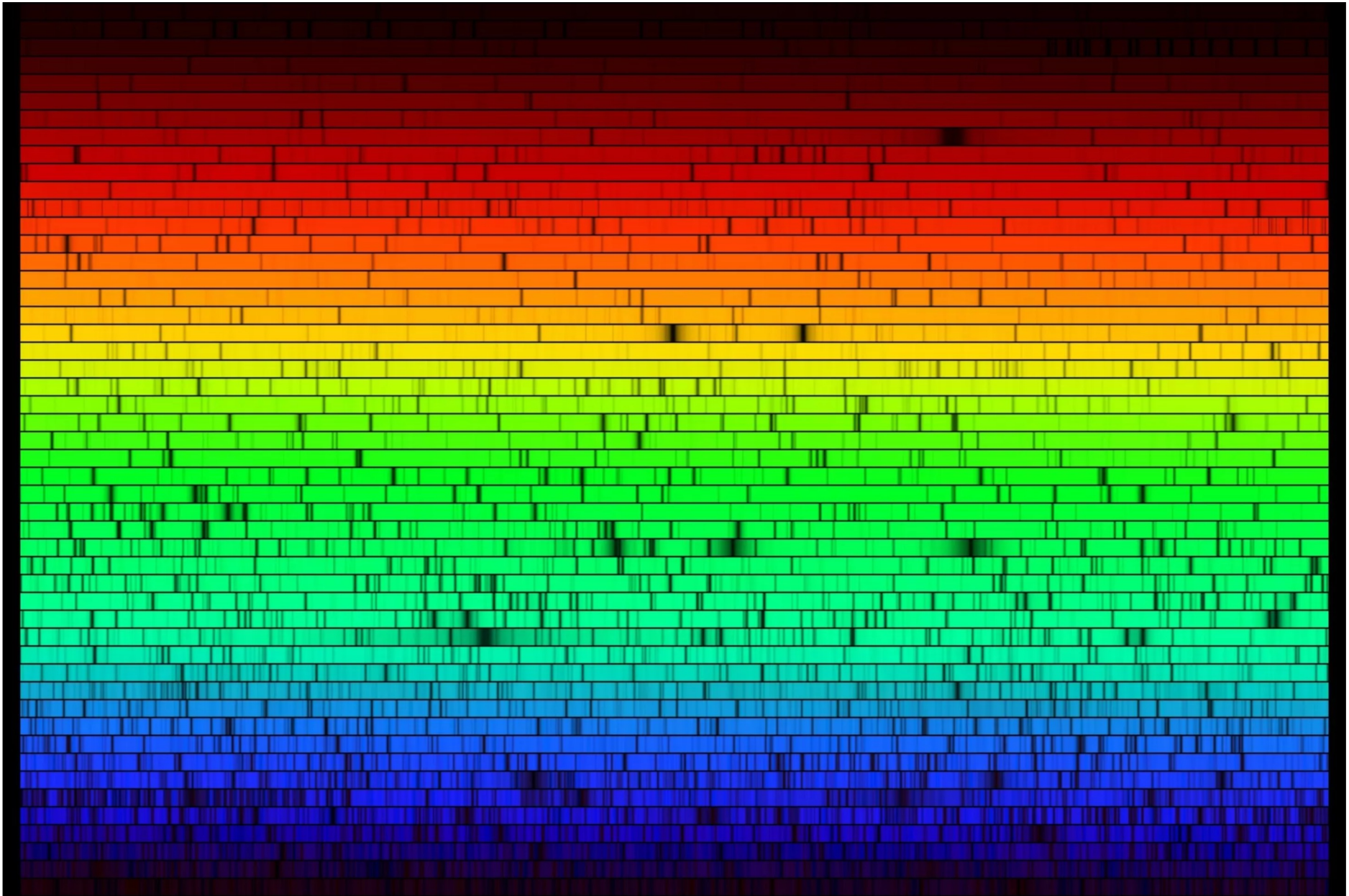


Spektri nebeskih tela

•Spektar nas automatski asocira na neku "dugu":

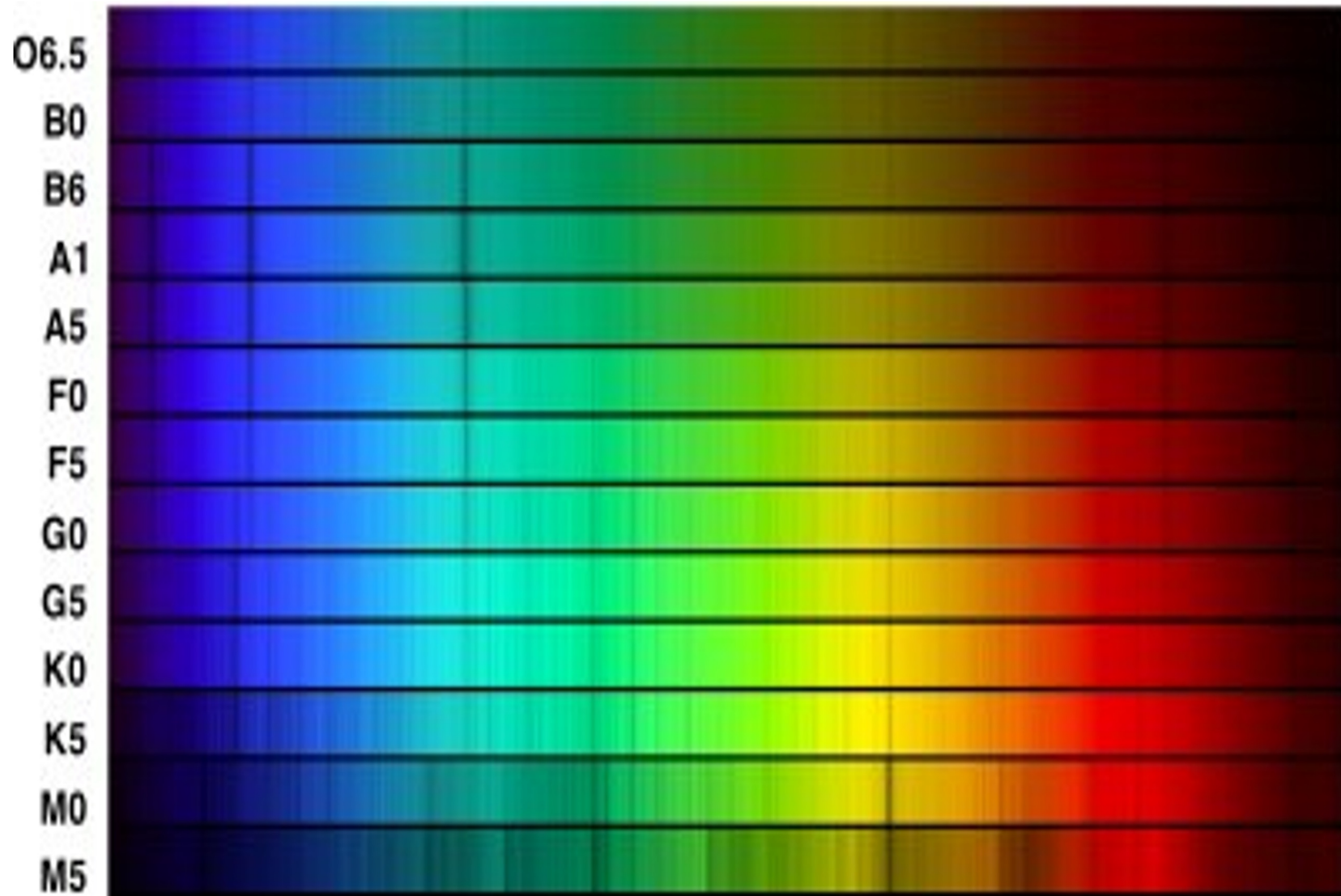


A duga je u stvari spektar sunčeve svetlosti



Spektri različnih zvezd

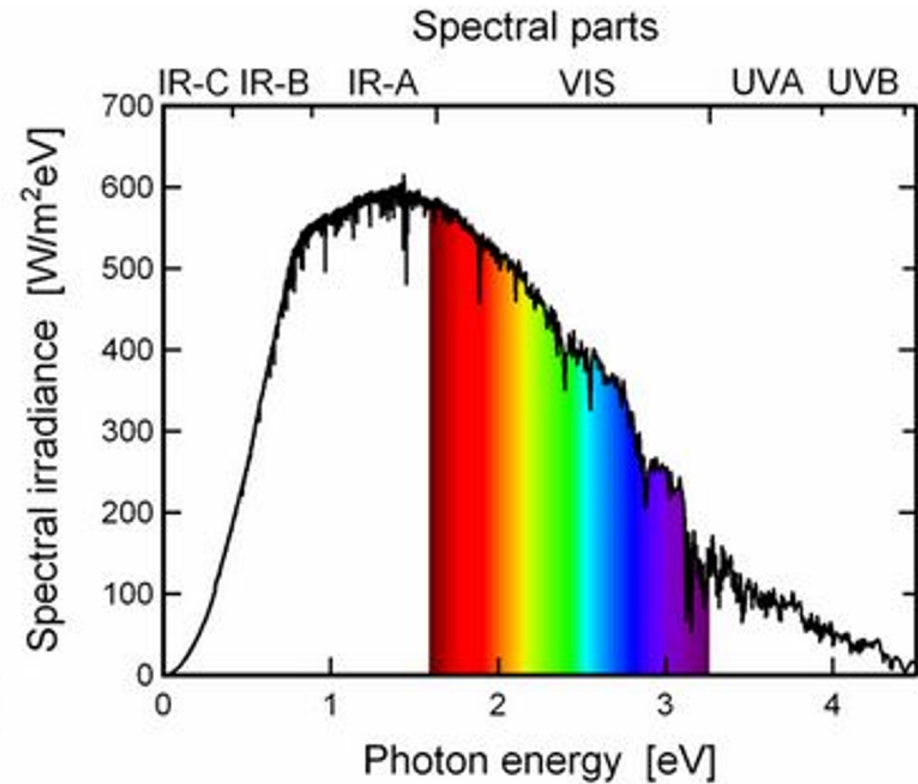
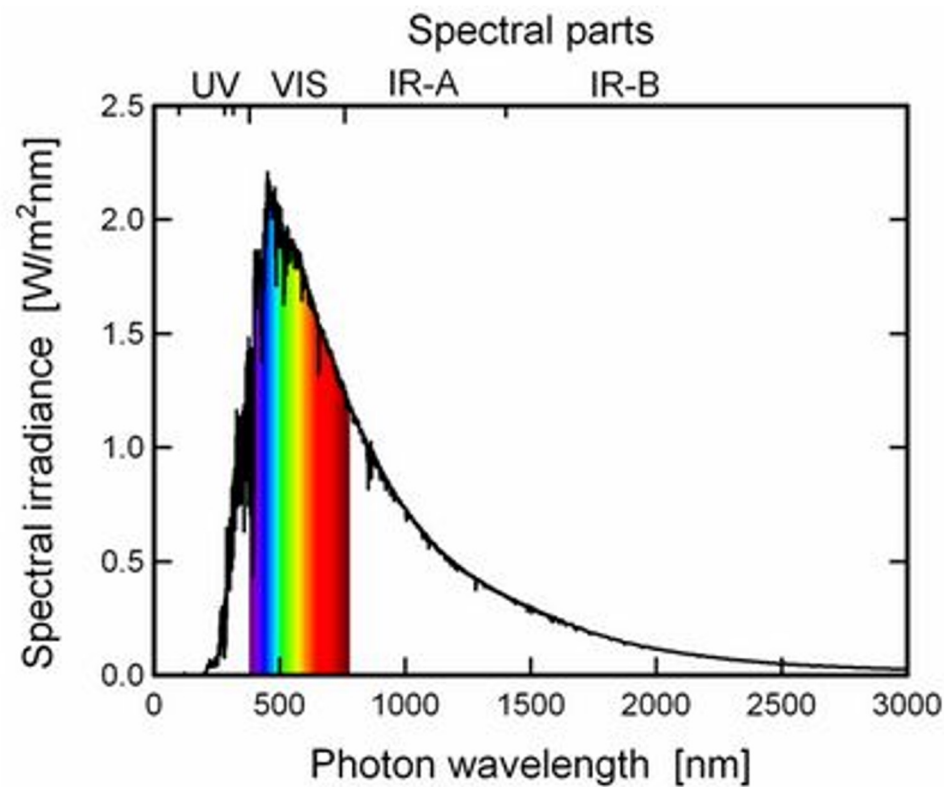
•Oslikavaju razlike, u njihovim fizičkim karakteristikama



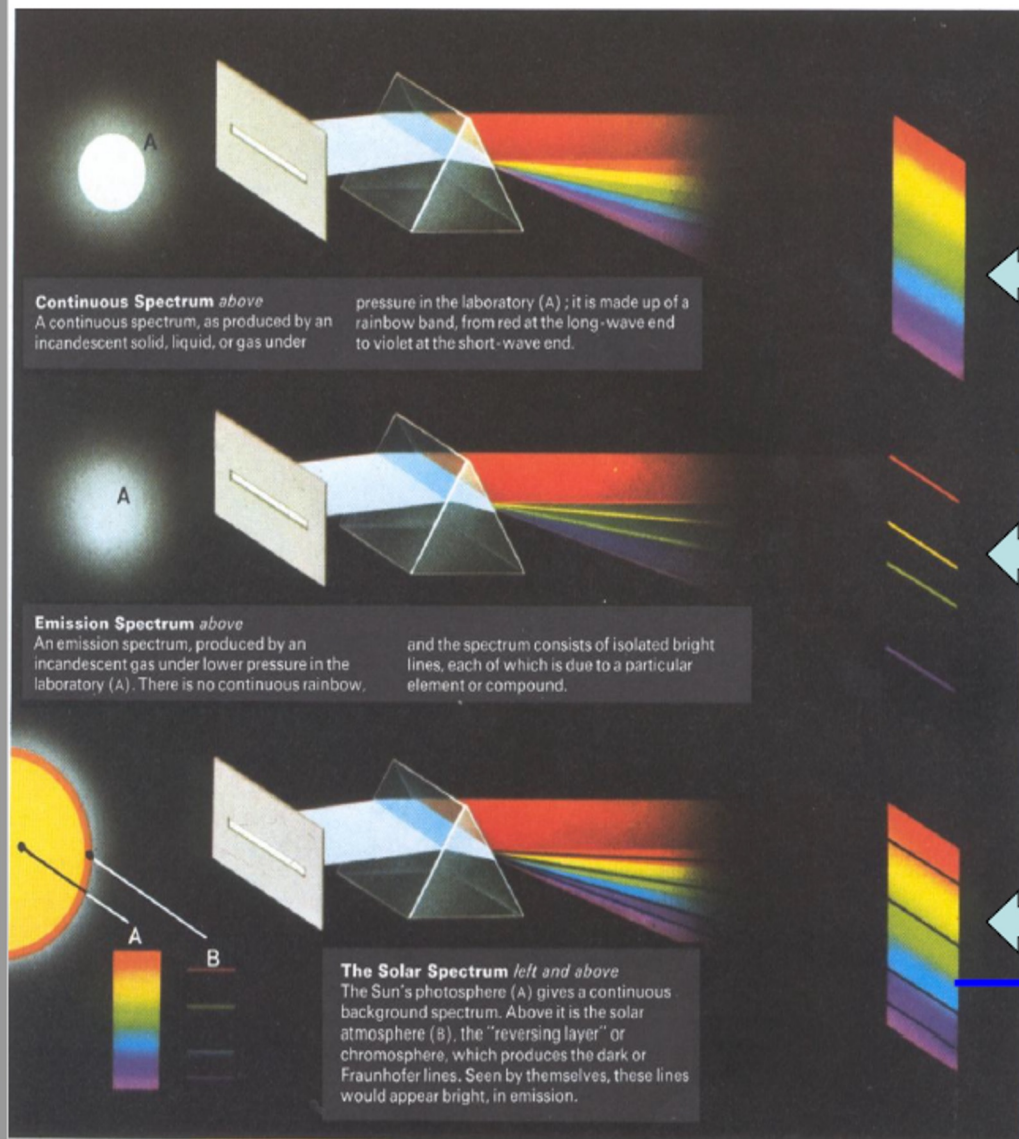
Spektar Sunca

•Spektar kao “sličica” nam nije od neke praktične koristi, češće ćemo crtati spektar kao funkciju:

•**Levo:** raspodela energije koju dobijamo od Sunca. **Desno:** raspodela fotona po energijama.



Kirhofovi zakoni apsorpcije i emisije



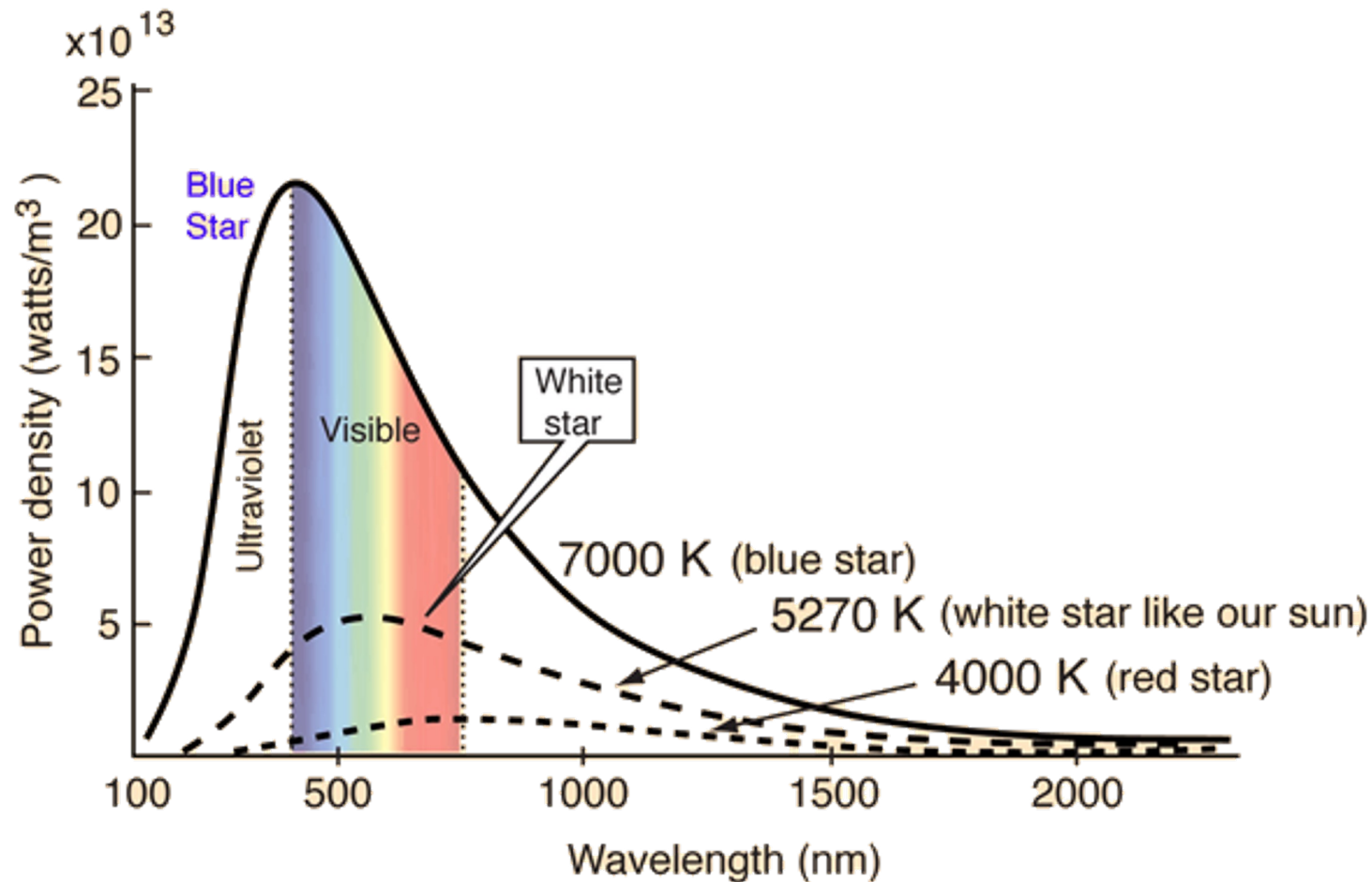
Kirhofovi zakoni (1860)

- Usijano čvrsto telo, tečnost ili gas pod visokim pritiskom emituju **neprekidni** spektar.
- Vreo gas pod niskim pritiskom emituje **emisioni linijski** spektar.
- Hladniji i redji gas ispred izvora neprekidnog zračenja daje **apsorpcioni** spektar.

Spektri Sunca i zvezda nastaju u njihovim spoljnim slojevima - zvezdanim atmosferama.

Apsolutno crno telo

- Teorijska idealizacija, opisuje raspodelu fotona u nekom idealnom ravnotežnom stanju.
- Usijana gusta tela (zvezde, čvrsta tela) se mogu dobro aproksimirati kao apsolutno crna tela. Ovo su “teorijski” spektri zvezda različitih temperatura



Plankov zakon zračenja apsolutno crnog tela

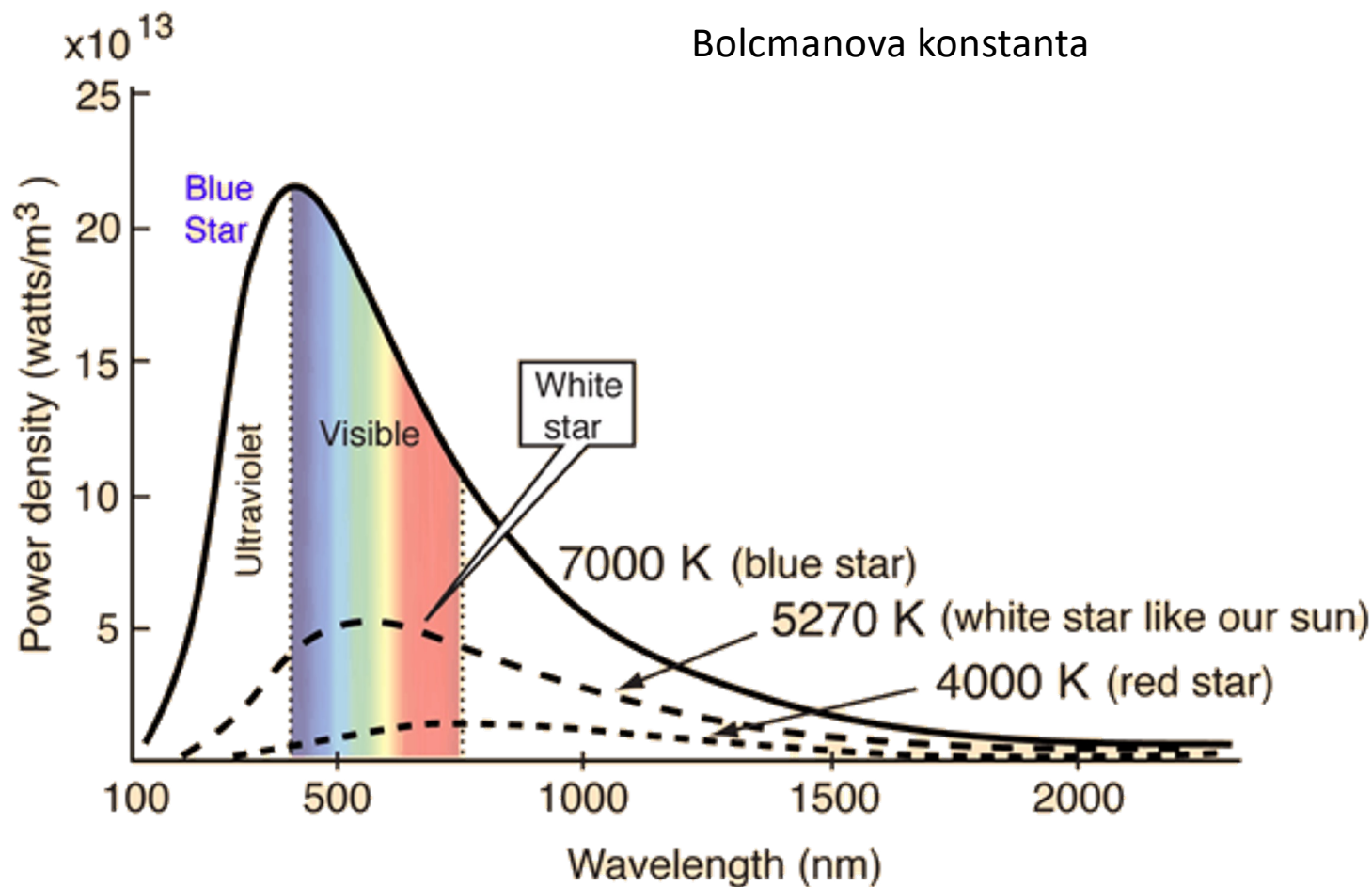
•Ova funkcija se može analitički zapisati:

Emisivnost tela

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Plankova konstanta

Temperatura tela

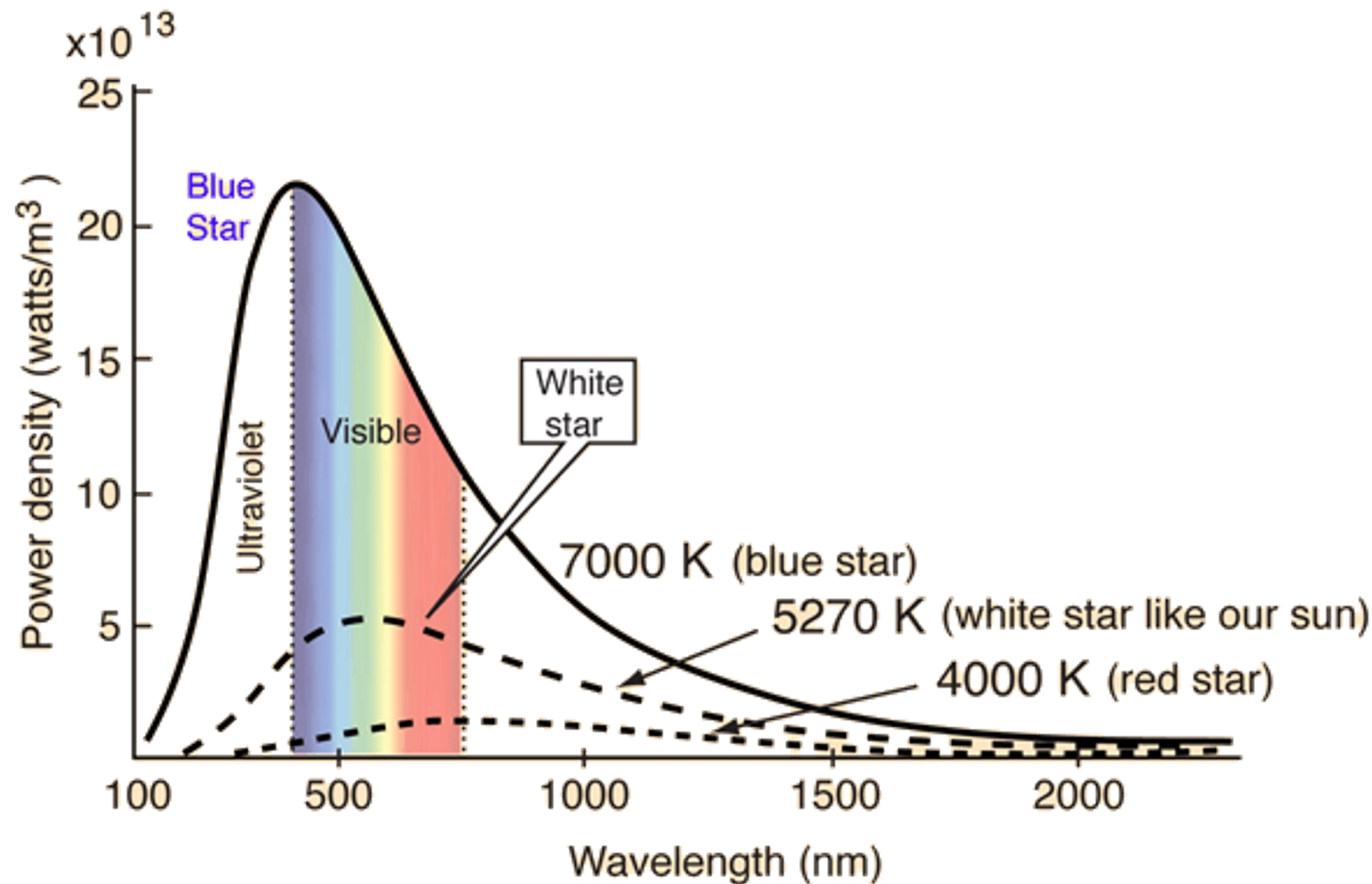


Plankov zakon zračenja apsolutno crnog tela

• Iz nje se može izvesti takozvani Štefan-Bolcmanov zakon:

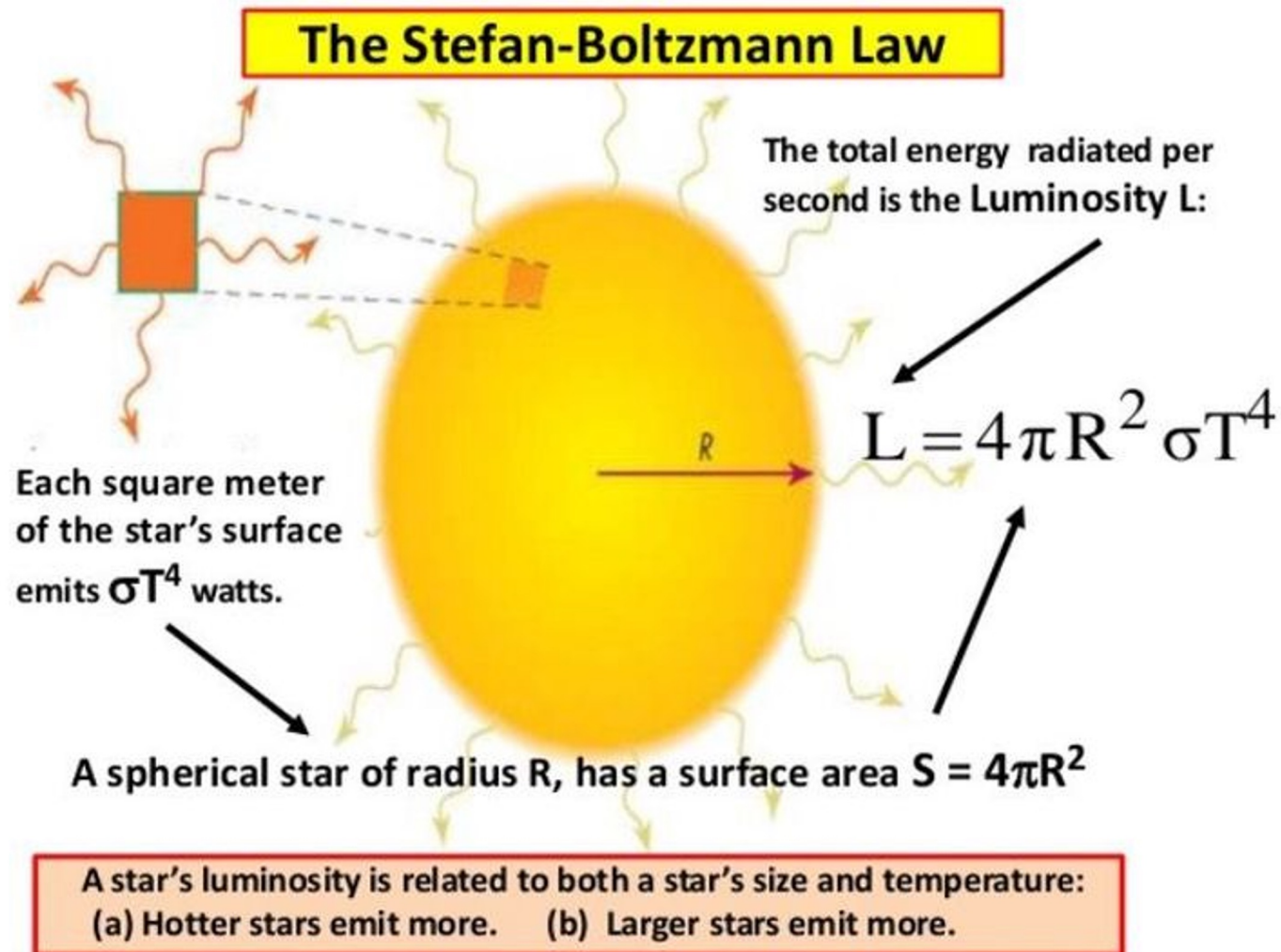
$$\epsilon = \sigma T^4$$

• Izračena energija na svim talasnim dužinama (integraljena po talasnim dužinama), po jedinici površine, srazmerna je četvrtom stepenu temperature!



Luminoznost zvezda

• Ukupna energija koju zvezda izrači u jedinici vremena jednaka je proizvodu površine i ukupne emisivnosti. Luminoznost Sunca je 3.828×10^{26} W! (Vati)



Pitanje:

- Ako postoje zvezde koje emituju više od Sunca, zašto nam Sunce izgleda sjajnije?

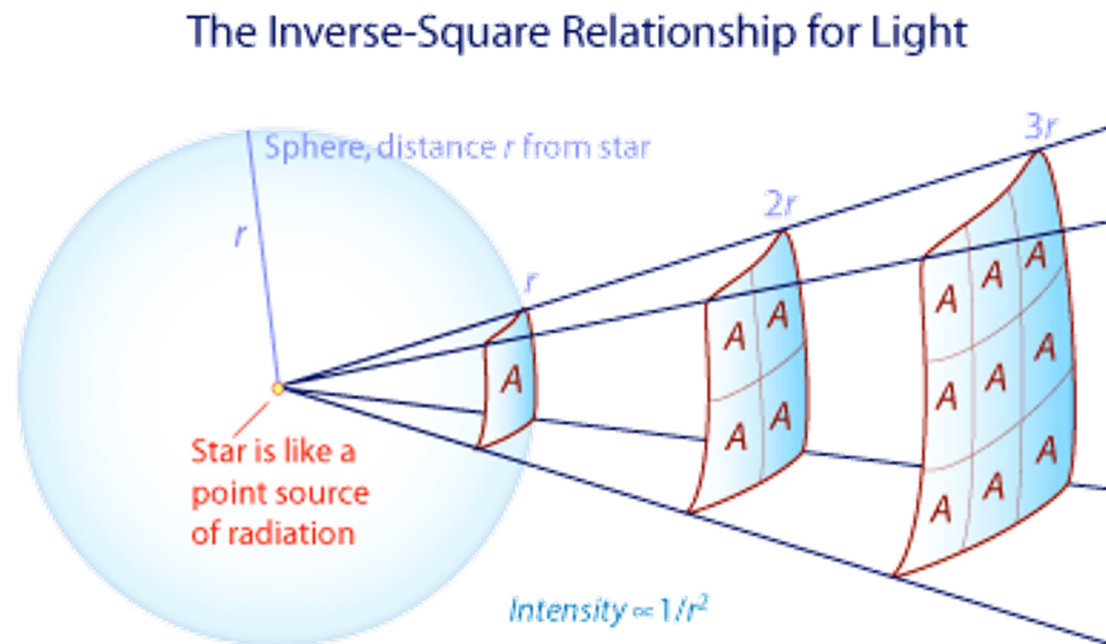
Pitanje:

•Ako postoje zvezde koje emituju više od Sunca, zašto nam Sunce izgleda sjajnije?

•Zato što je bliže!

•Veličina koju merimo se zove **osvetljenost (irradiance)**:

$$\mathcal{E} = \frac{dE^{\text{primljeno}}}{dA^{\text{primljeno}}} = \frac{L}{4\pi d^2}$$



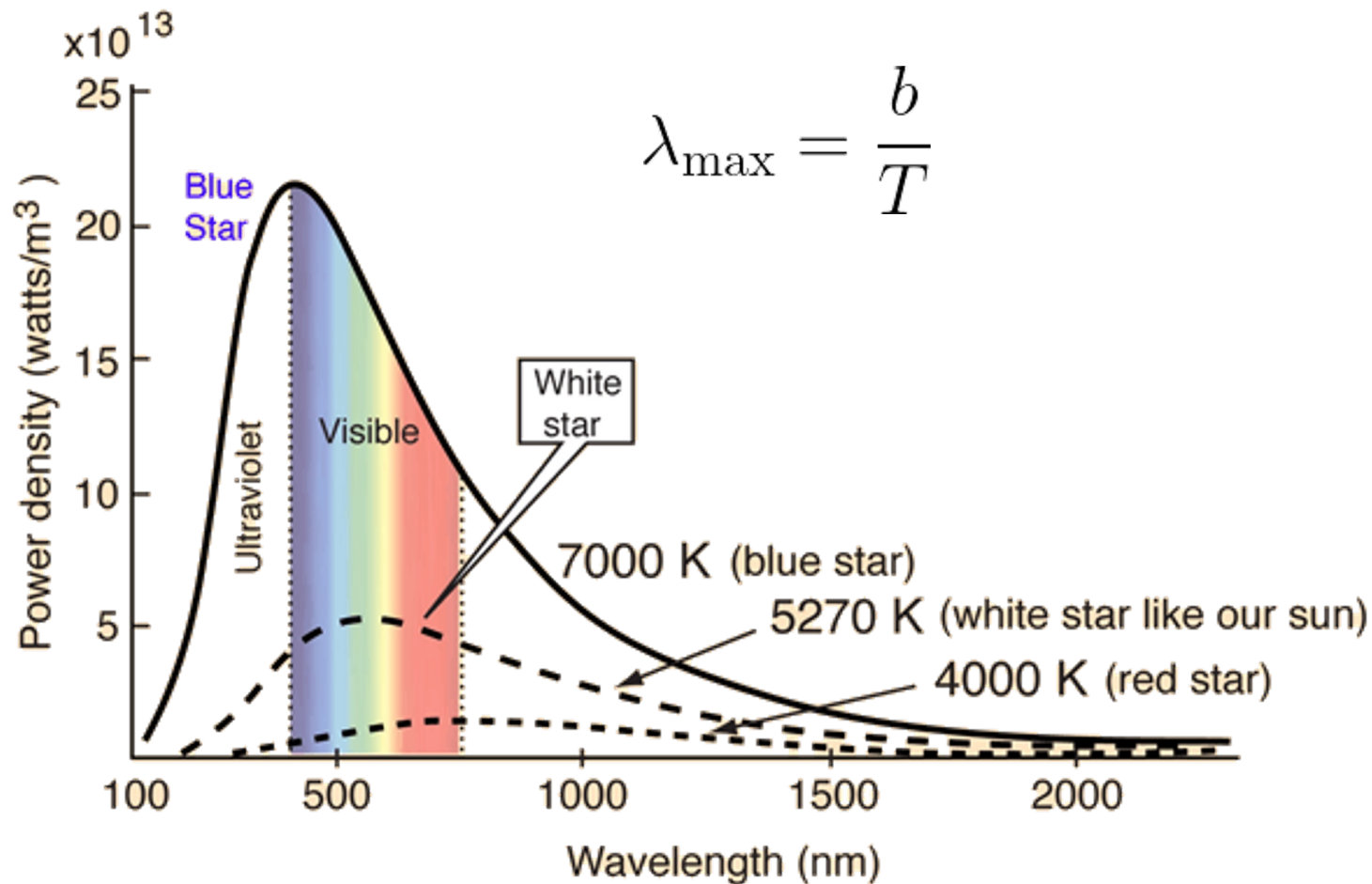
At a distance $2r$ from the source the radiation is spread over four times the area so is only $1/4$ the intensity that it is a distance r .

Radiation obeys an *inverse-square* relationship with distance.

Osvetljenost koju Zemlja dobija od Sunca iznosi oko 1400 W po m^2 !

Wien-ov (Vinov) zakon pomeranja

- Maksimum zračenja se pomera ka većim talasnim dužinama za manje temperature emitujućeg tela:



Pitanje

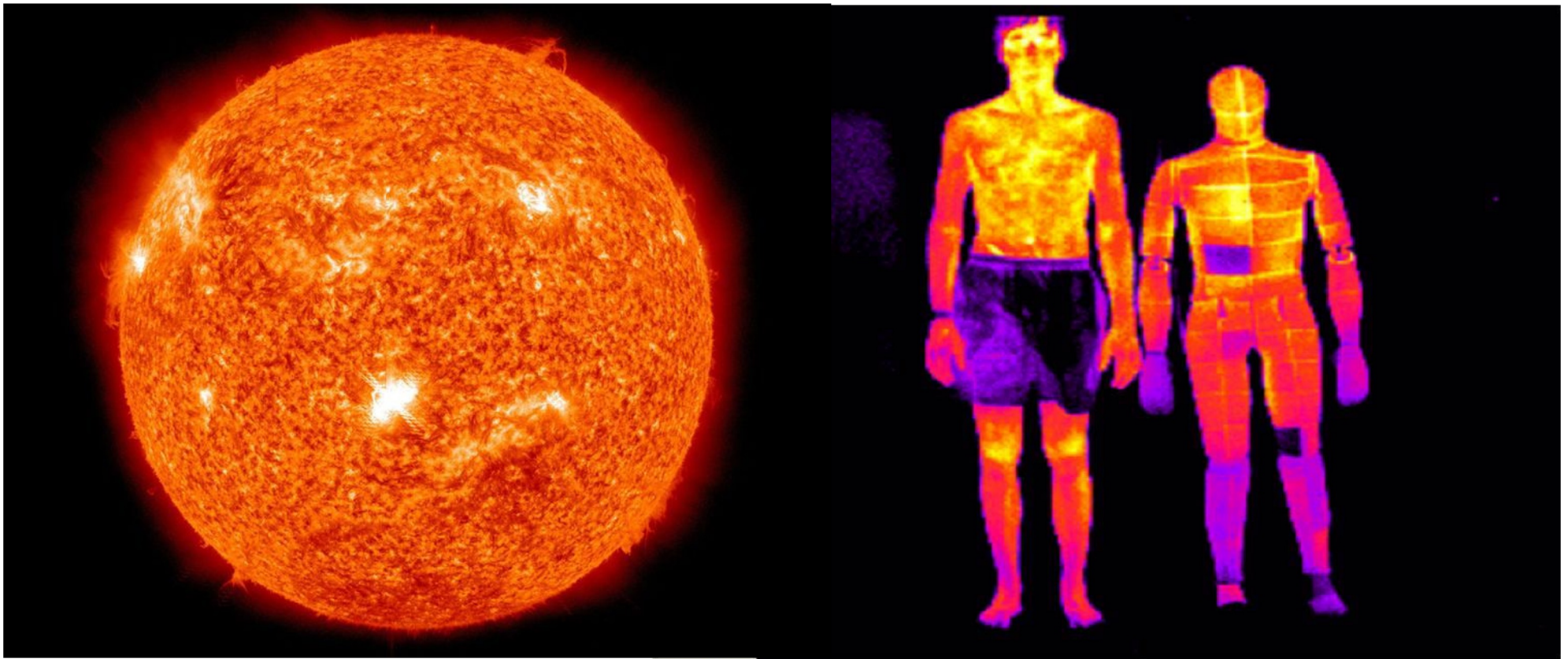
- Maksimum Sunčevog zračenja je na nekih 500 nm, na kojoj talasnoj dužini je maksimum zračenja (ne refleksije!) ljudskog tela?
- Kom delu spektra to odgovara?

Pitanje

•Maksimum Sunčevog zračenja je na nekih 500 nm, na kojoj talasnoj dužini je maksimum zračenja (ne refleksije!) ljudskog tela?

•Kom delu spektra to odgovara?

•**Odgovor:** Ljudsko telo je nekih 20 puta hladnije od Sunčeve površine pa je talasna dužina oko 20 puta veća, dakle oko **10 mikrometara. (IC deo spektra)**



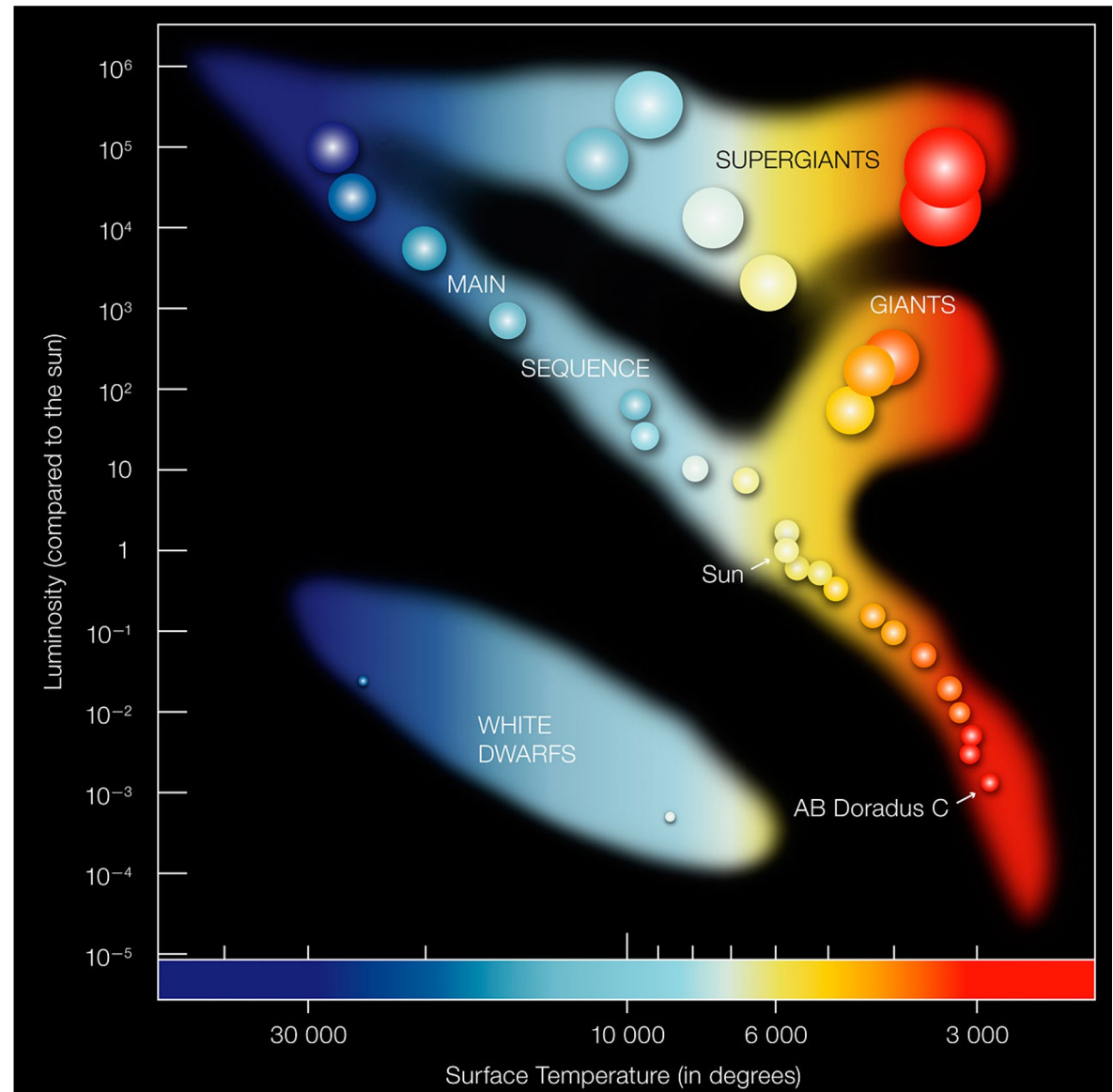
Da sumiramo:

- Talasi** su poremećaji u nekoj sredini koji se prenose. Brzina prenosa zavisi od karakteristika sredine. Ti poremećaji prenose energiju.
- Svetlost** je talas koji se prenosi jako velikom brzinom. Svetlost je poremećaj u električnom i magnetnom polju. Pošto ta polja postoje i u vakuumu, svetlost može da se prenosi kroz vakuum.
- Svetlost možemo da tretiramo i kao **česticu** , **foton**. U različitim situacijama vidimo talasnu ili čestičnu prirodu svetlosti.
- Svetlost nastaje u različitim procesima. Zvezde emituju svetlost nauštrb **termalne energije čestica**.
- Prva (ili bolje da kažemo nulta) aproksimacija je da zvezde emituju svetlost kao **apsolutno crna tela** – omogućava nam da vrlo lako opišemo zračenje zvezda (i sličnih gasova)

Klasifikacija zvezda po bojama / Luminoznosti

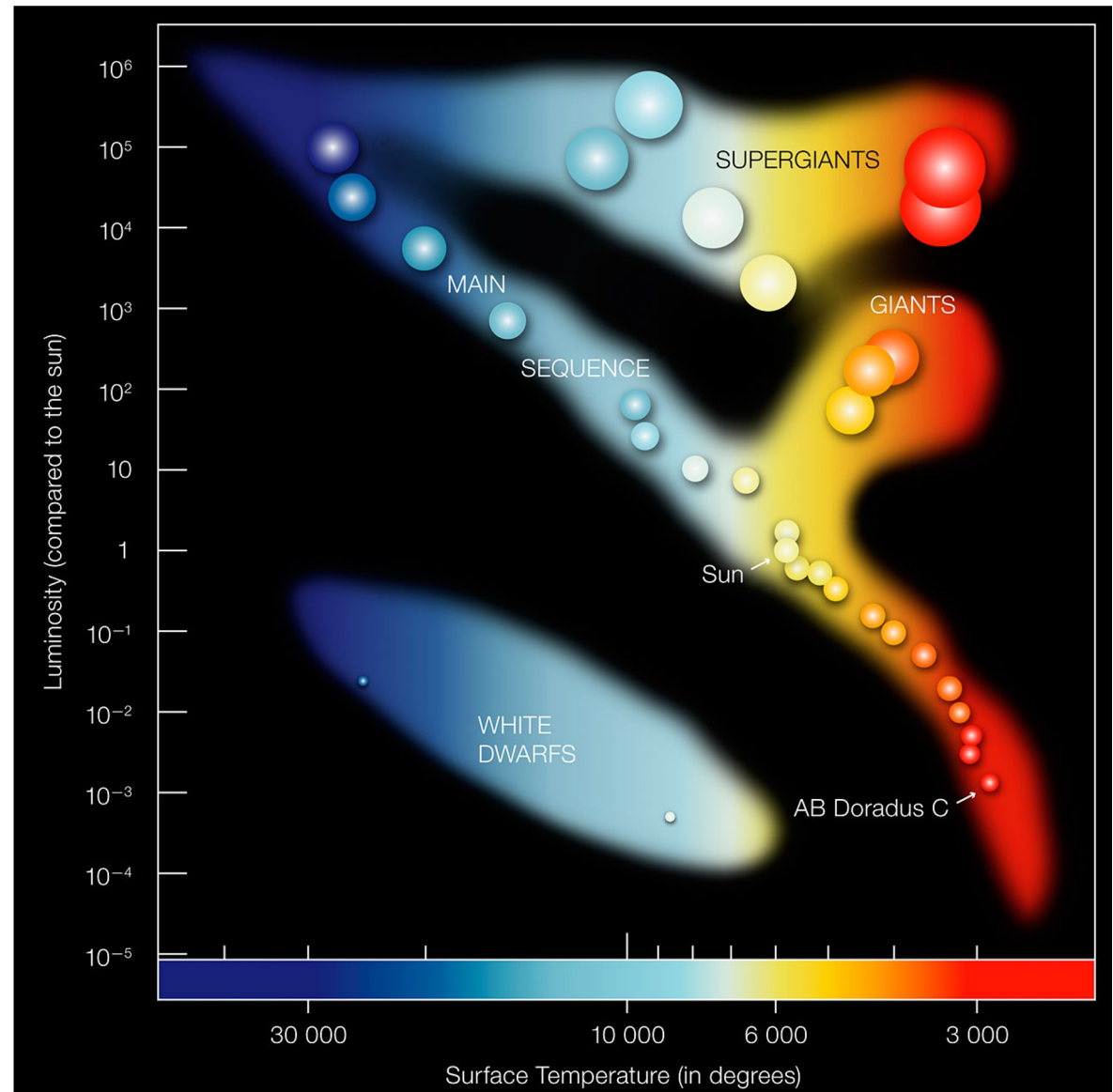
- Glavni niz: Zvezde značajno menjaju **luminoznost (snagu)**, ali ne toliko veličinu.
- Radijus zvezda se menja najviše za jedan red veličine.
- Zanimljivo je da sjajnije, masivnije zvezde žive **mного kraće** od manje sjajnih, manje masivnih zvezda.
- Medjutim, neke zvezde su jako tople, ali ipak nisu sjajne, neke su jako sjajne iako nisu tople, šta se tu dešava?

$$L = 4R^2\pi\sigma T^4$$



Klasifikacija zvezda po bojama / Luminoznosti

- Glavni niz: Zvezde značajno menjaju **luminoznost (snagu)**, ali ne toliko veličinu.
- Radijus zvezda se menja najviše za jedan red veličine.
- Zanimljivo je da sjajnije, masivnije zvezde žive **mного kraće** od manje sjajnih, manje masivnih zvezda.
- Medjutim, neke zvezde su jako tople, ali ipak nisu sjajne, neke su jako sjajne iako nisu tople, šta se tu dešava?
- To su zvezde drugih "klasa luminoznosti"**



Zvezde po spektralnim klasama:

•O, B, A, F, G, K, M – temperatura od ~50 000 K do ~ 3000 K

•Postoji još nekoliko “specijalnih” spektralnih klasa: L, T, Y, W, plus specijalne podklase osnovnih sedam klasa

•**Boje** koje pripisujemo zvezdama **nisu** boje koji bismo videli golim okom!

•Ovo je tabela koja opisuje zvezde takozvanog “glavnog niza”, to su zvezde koje su u “stabilnom” periodu života. Fuzionišu vodonik u helijum i tako stvaraju energiju koja ih održava (više o ovome za dva časa).

Class	Effective temperature ^{[2][3]}	Vega-relative chromaticity ^{[4][5][a]}	Chromaticity (D65) ^{[6][7][4][b]}	Main-sequence mass ^{[2][8]} (solar masses)	Main-sequence radius ^{[2][8]} (solar radii)	Main-sequence luminosity ^{[2][8]} (bolometric)
O	≥ 30,000 K	blue	blue	≥ 16 M_{\odot}	≥ 6.6 R_{\odot}	≥ 30,000 L_{\odot}
B	10,000–30,000 K	blue white	deep blue white	2.1–16 M_{\odot}	1.8–6.6 R_{\odot}	25–30,000 L_{\odot}
A	7,500–10,000 K	white	blue white	1.4–2.1 M_{\odot}	1.4–1.8 R_{\odot}	5–25 L_{\odot}
F	6,000–7,500 K	yellow white	white	1.04–1.4 M_{\odot}	1.15–1.4 R_{\odot}	1.5–5 L_{\odot}
G	5,200–6,000 K	yellow	yellowish white	0.8–1.04 M_{\odot}	0.96–1.15 R_{\odot}	0.6–1.5 L_{\odot}
K	3,700–5,200 K	light orange	pale yellow orange	0.45–0.8 M_{\odot}	0.7–0.96 R_{\odot}	0.08–0.6 L_{\odot}
M	2,400–3,700 K	orange red	light orange red	0.08–0.45 M_{\odot}	≤ 0.7 R_{\odot}	≤ 0.08 L_{\odot}

Rezime:

- Emitovana energija (u pola sfere), po jedinici površine, u jedinici vremena, po jedinici talasne dužine – **spektralna emisivnost / emitovana gustina fluksa:**

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

- Integraljena po talasnim dužinama: **emisivnost / emitovana gustina fluksa:**

$$\epsilon = \sigma T^4$$

- Integraljena po površini (ovde pretpostavljamo homogenost): **luminoznost:**

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- Primljena energija po jedinici površine: **osvetljenost**

$$\mathcal{E} = \frac{d^2 E}{dA dt} \stackrel{\text{O}}{=} \frac{L}{4\pi d^2}$$

Ovo pretpostavlja izotropno zračenje. Dobra aproksimacija za zvezde, loša za npr. lasere

Rezime:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$\epsilon = \sigma T^4$$

$$\mathcal{E} = \frac{d^2 E}{dA dt} = \frac{L}{4\pi d^2}$$

• Naravno, možemo da definišemo i razne kombinacije ovih veličina, npr: **spektralnu luminoznost**, ili **spektralnu osvetljenost**.

• Ne zaboravite da prve dve jednačine slede iz pretpostavke **apsolutno crnog tela**, treća iz pretpostavke da je zvezda homogena a četvrta iz toga da zvezda (ili bilo koji objekt) zrači izotropno.

• Striktno gledano, nijedna od ovih relacija ne važi ali su, barem za nas, dobre aproksimacije.

Magnituda

- Kao što smo videli, raspon luminoznosti (apsolutnog sjaja) zvezda je nekoliko redova veličina.
- Zbog različite udaljenosti do različitih zvezda, osvetljenost (prividni sjaj) zvezda pokriva još nekoliko redova veličina.
- Ljudska čula su logaritamski osetljiva na nadražaje.
- Zato npr., izražavamo intenzitet zvuka u dB (logaritamska skala):

Source	Intensity	Intensity level	× TOH
Threshold of hearing (TOH)	10^{-12}	0 dB	1
Whisper	10^{-10}	20 dB	10^2
Pianissimo	10^{-8}	40 dB	10^4
Normal conversation	10^{-6}	60 dB	10^6
Fortissimo	10^{-2}	100 dB	10^{10}
Threshold of pain	10	130 dB	10^{13}
Jet take-off	10^2	140 dB	10^{14}
Instant perforation of eardrum	10^4	160 dB	10^{16}

Table 1.1 from [Müller, FMP, Springer 2015]

Magnitude

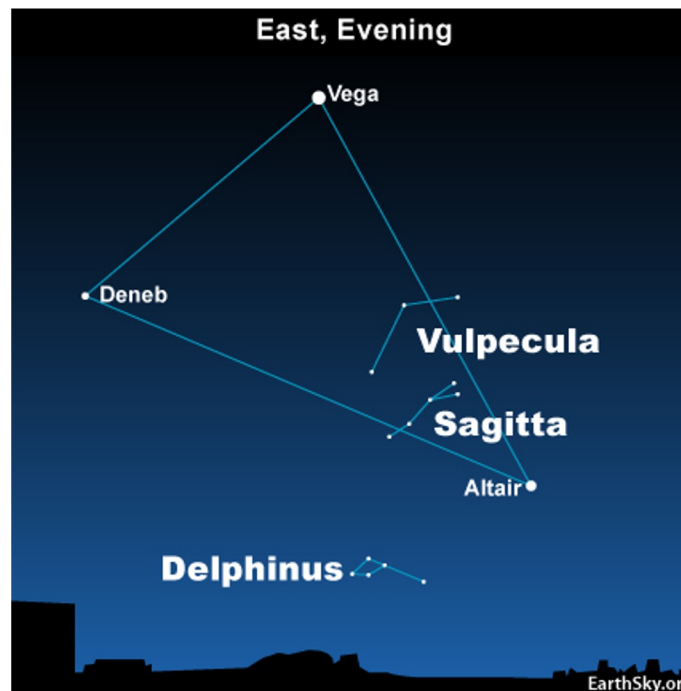
- Zato astronomi koriste **magnitude** – jedinice za prividni i apsolutni sjaj u logaritamskoj skali:
 - Uveo ih je **Pogson**, pre nekih 150 godina, imitirajući podelu na “klase” koje su uveli stari grci.
- Prividna** magnituda neke zvezde je:

$$m = -2.5 \log \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0}$$

Osvetljenost koju primamo od zvezde

Zvezda koja ima prividnu magnitudu **nula** je **Vega** (najsajjnija zvezda u sazveždju Lire)

Referentna osvetljenost (osvetljenost koju daje zvezda magnitude 0).



Neki sjajni objekti na nebu:

Object	V	Note
Sun	-26.7	
Full Moon	-12.0	
Venus	-4.7	at brightest
Sirius	-1.4	α Canis Major
Vega	0.0	α Lyra
Castor	0.0	α Gemini
Deneb	0.1	α Cygnus
Altair	0.2	α Aquila
Polaris	0.6	α Ursa Minor
Pollux	1.0	β Gemini
Betelgeuse	1.5	α Orion
Aldebaran	1.5	α Taurus
Antares	1.9	α Scorpius

Kada Betelgez postane crveni džin, prividna magnituda će mu biti -12.4!

Prividna magnituda

•Mera prividnog sjaja objekta

•Što je magnituda manja, to je objekat **sjajni** (zapamtite to kao: prva magnituda je prva “klasa”, druga magnituda je druga “klasa”, itd...)

•Magnituda zavisi od **stvarnog** sjaja objekta i od **udaljenosti** do tog objekta:

$$m = -2.5 \log \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0}$$

$$\mathcal{E} = \frac{L}{4\pi d^2}$$

•Kako onda izražavamo **apsolutni sjaj** nekog objekta?

•**Apsolutnom magnitudom**

Apsolutna magnituda

•Mera apsolutnog (stvarnog) sjaja nekog objekta, tj. njegove **luminoznosti**

$$M = -2.5 \log \frac{L}{L_0}$$

$$M - m = 2.5 \log \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}(d = 10\text{pc})}$$

•Npr **Rigel** (jedna od zvezda u sazveždju Orion) ima prividnu magitudu 0.12 i nalazi se na udaljenosti od oko 860 svetlosnih godina. Kolika je njena apsolutna magnituda?

•Apsolutna magnituda je **prividna magnituda nekog objekta koju bi taj objekt imao da je na udaljenosti 10 pc.**

Apsolutna i prividna magnituda nam daju udaljenost:

$$M = -2.5 \log \frac{L}{L_0}$$

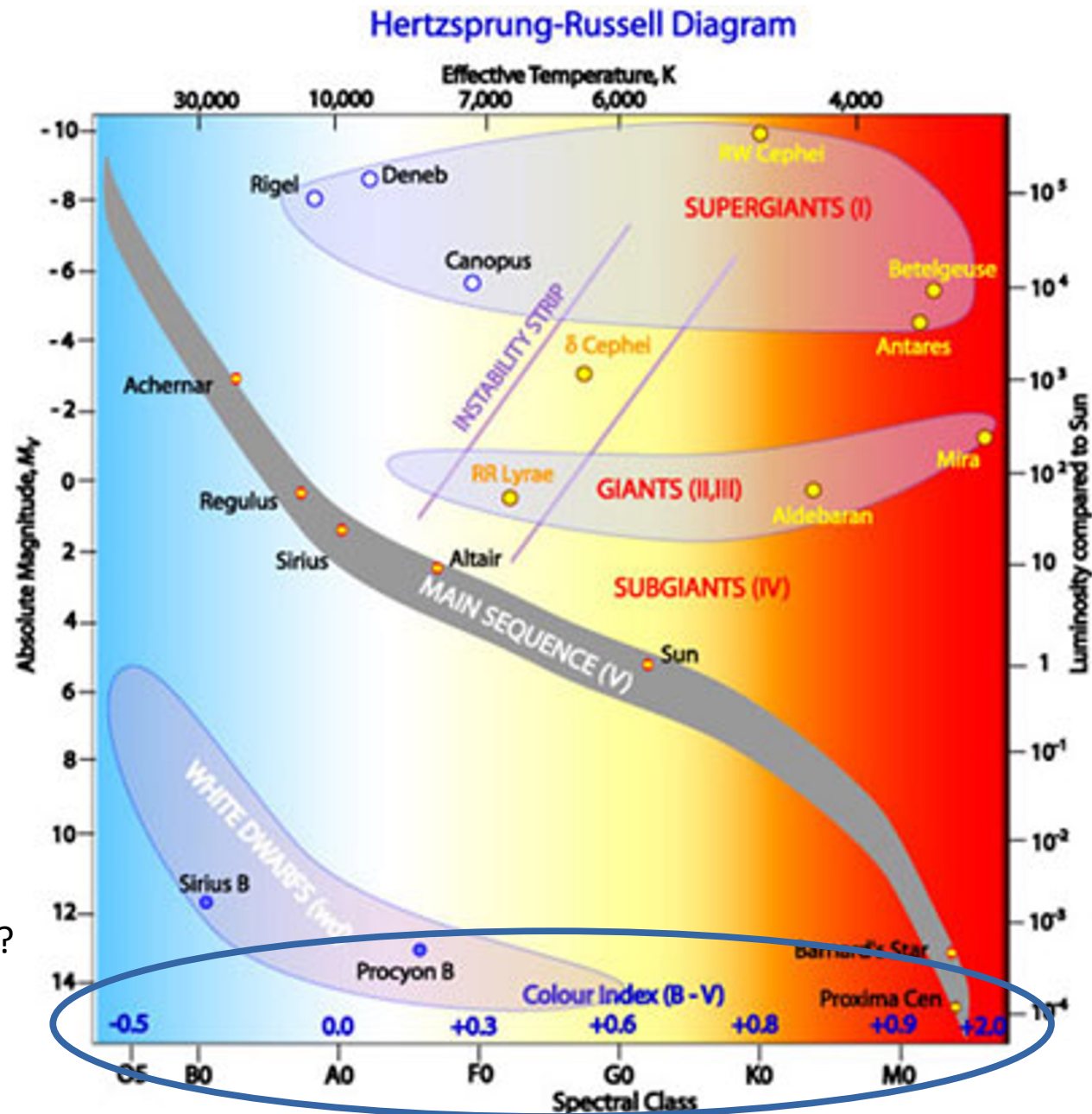
$$M - m = 2.5 \log \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}(d = 10\text{pc})}$$

$$M - m = 2.5 \log \frac{L/4\pi d^2}{L/4\pi(10\text{pc})^2}$$

$$M - m = 5 - 5 \log d \quad \text{Modulo udaljenosti}$$

- Zamenom vrednosti dobili bismo da je apsolutna magnituda Rigela oko -7!
- Poredjenja radi, apsolutna magnituda Sunca je 4.8.
- Znači Rigel je oko 100 000 puta sjajniji od Sunca (emituje 100 000 puta više energije!)

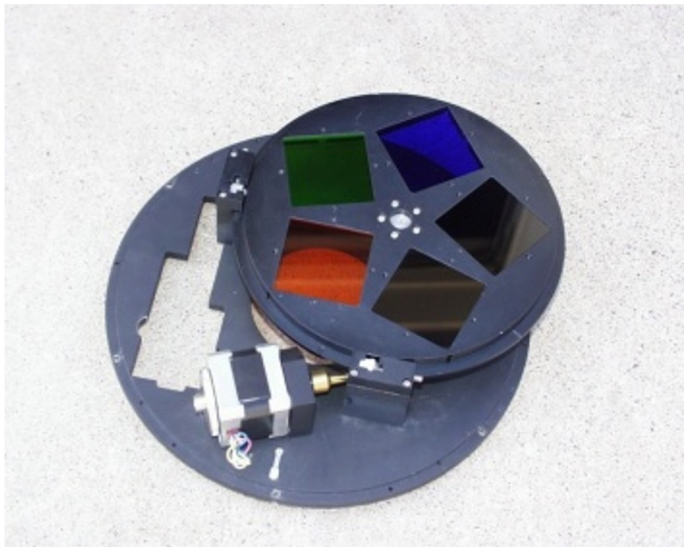
HR dijagram sa apsolutnom magnitudom



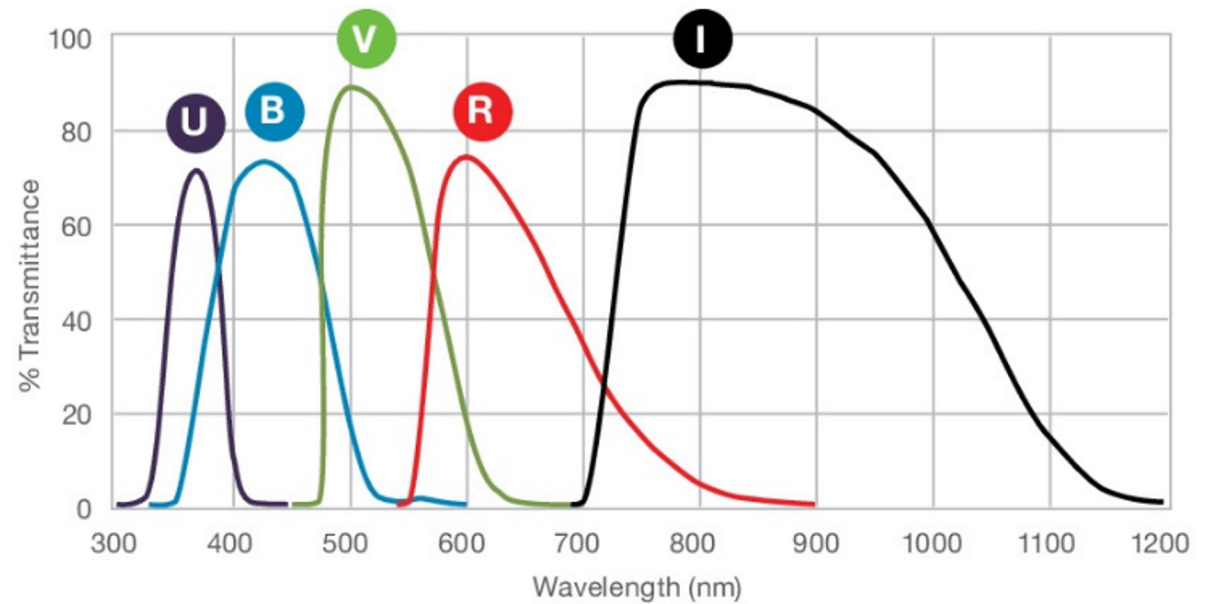
Šta je sad pa ovo?

Magnitude zvezda u filterima

•Ako odredimo sjaj zvezde u nekom opsegu talasnih dužina, onda imamo neki uvid i u njenu fiziku:

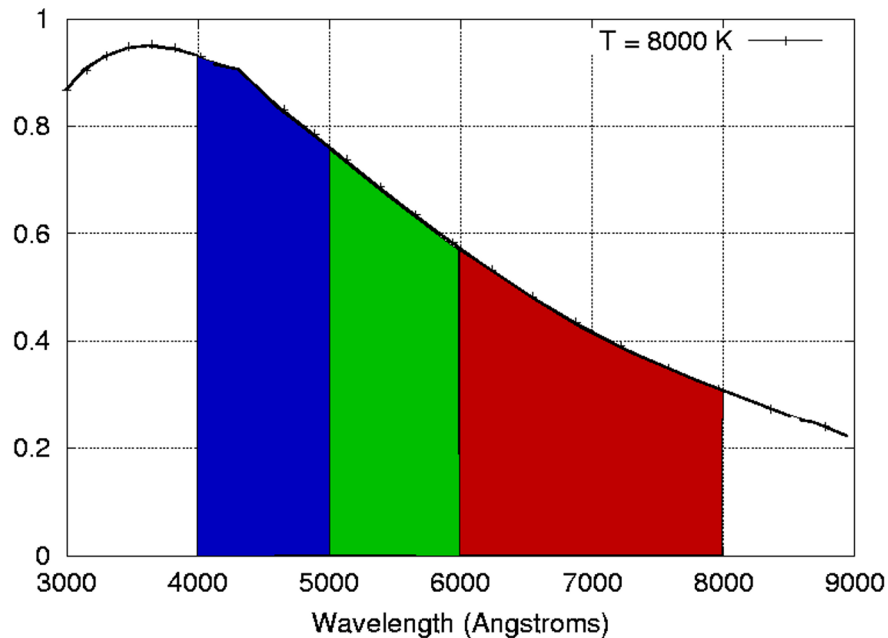


Johnson/Bessel UBVRI Filters

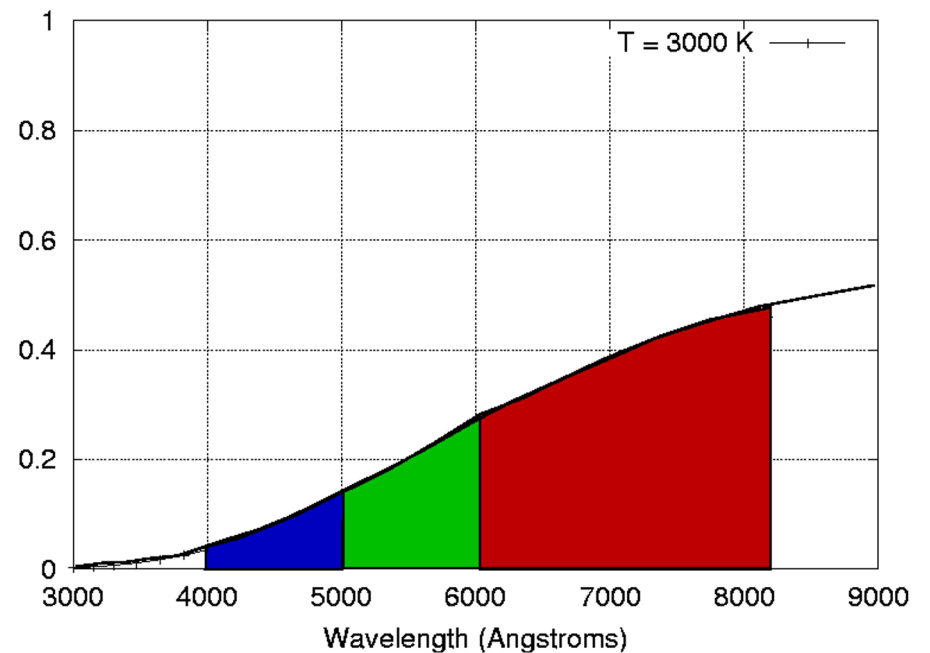


- U filter (P/N JOHN-U-XX)
- B filter (P/N JOHN-B-XX)
- V filter (P/N JOHN-V-XX)
- R filter (P/N JOHN-R-XX)
- I filter (P/N JOHN-I-XX)

Kolor indeks (*color index = CI*)



Topla zvezda



Hladna zvezda

$$CI = M_B - M_V = m_B - m_V$$

Plavljje (hladnije) zvezde imaju negativan kolor indeks, crvenije (hladnije), imaju pozitivan. Kolor indeks možemo, u principu, definisati izmedju bilo koja dva filtera!