

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** ($T, p, g, B, v_{\text{rad}}, v_{\text{rot}} \dots$) 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**)

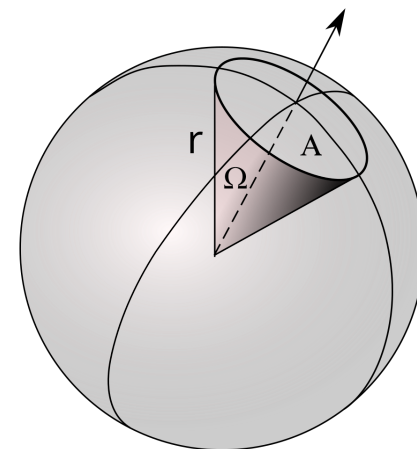
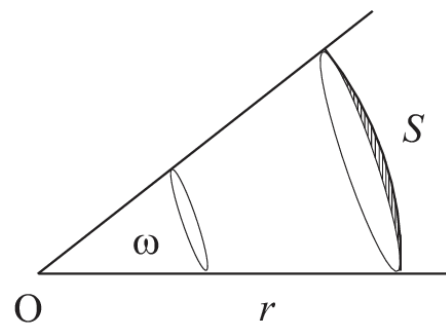
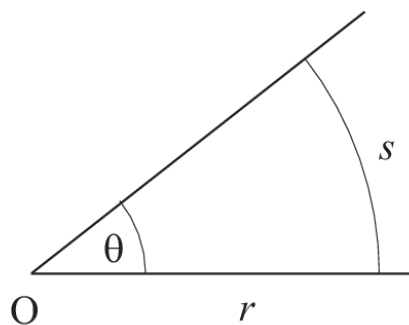
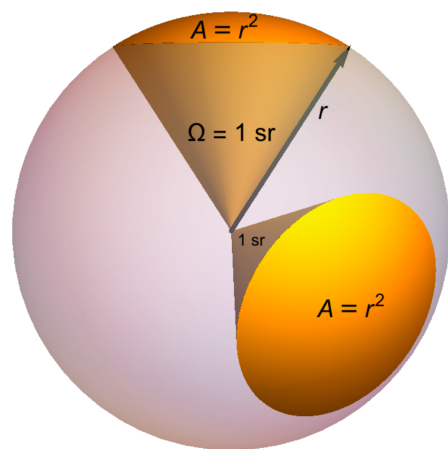
Fotometrija je metoda merenja fluksa zračenja, unutar određenog opsega talasnih dužina, koji stiže do posmatrača.

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 steradianima 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 steradiana.

Fotometrijske veličine i jedinice

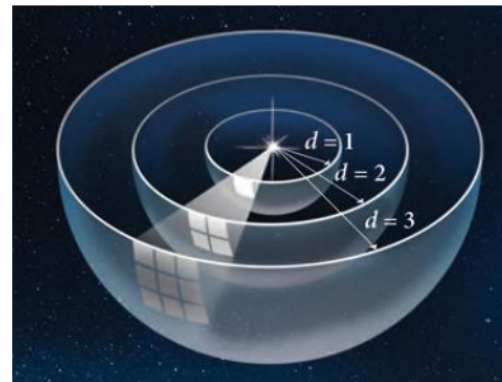
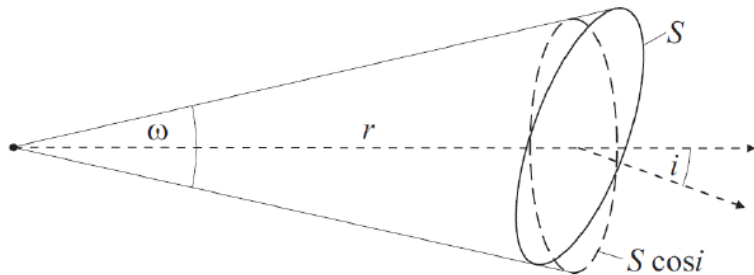
Tačkasti izvori (zvezde)

- 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]
 $E = \Phi / S$



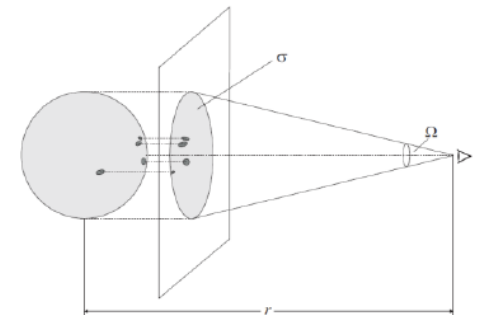
Osvetljenost opada sa kvadratom rastojanja

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

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



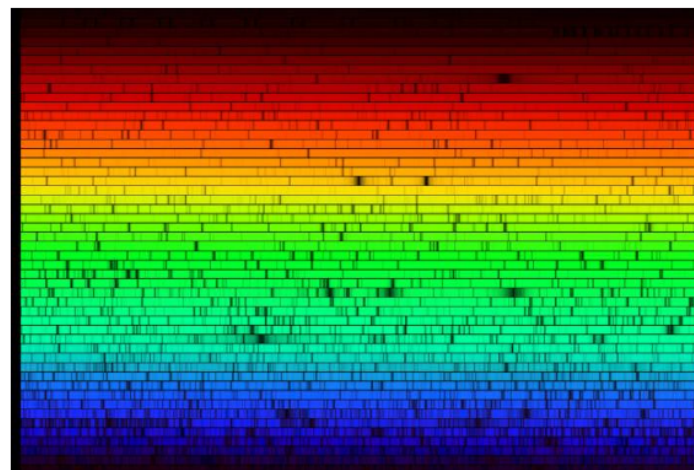
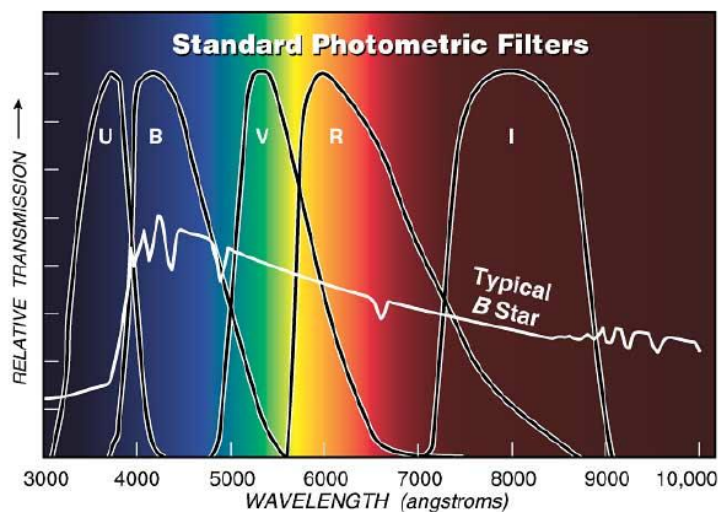
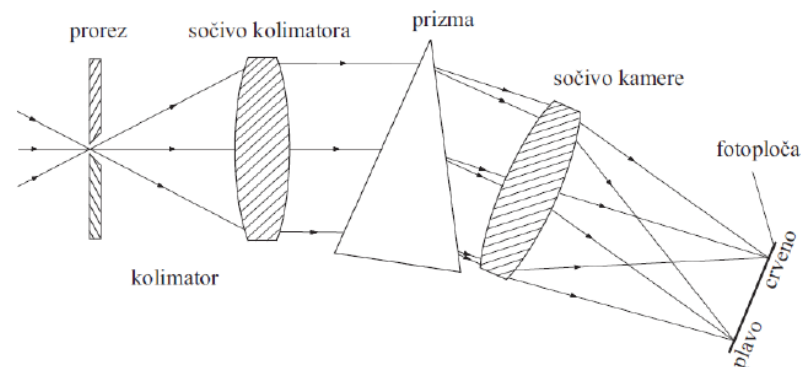
Fotometrija i spektrometrija

Posmatramo zračenje unutar određenog opsega talasnih dužina:

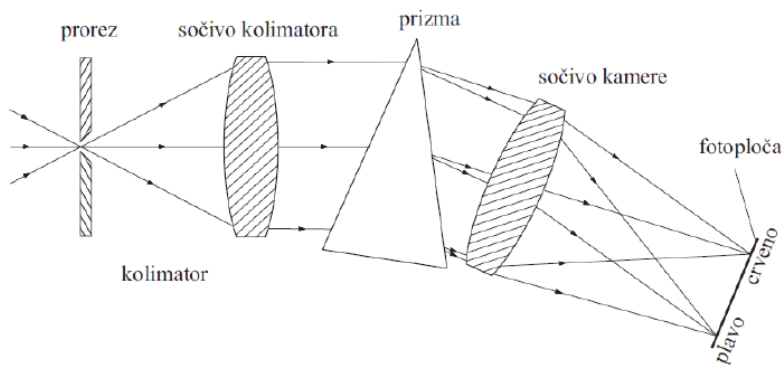
filteri – fotometrija



spektrograf - spektrometrija



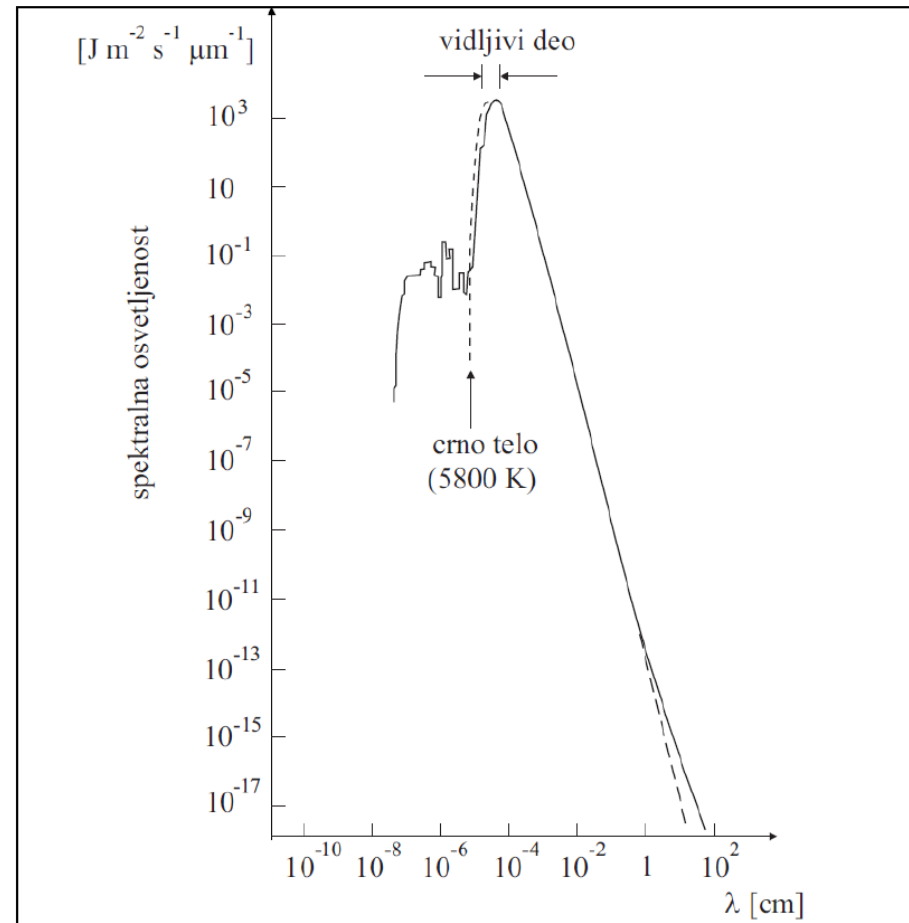
Spektrograf



Veličina koja se meri:

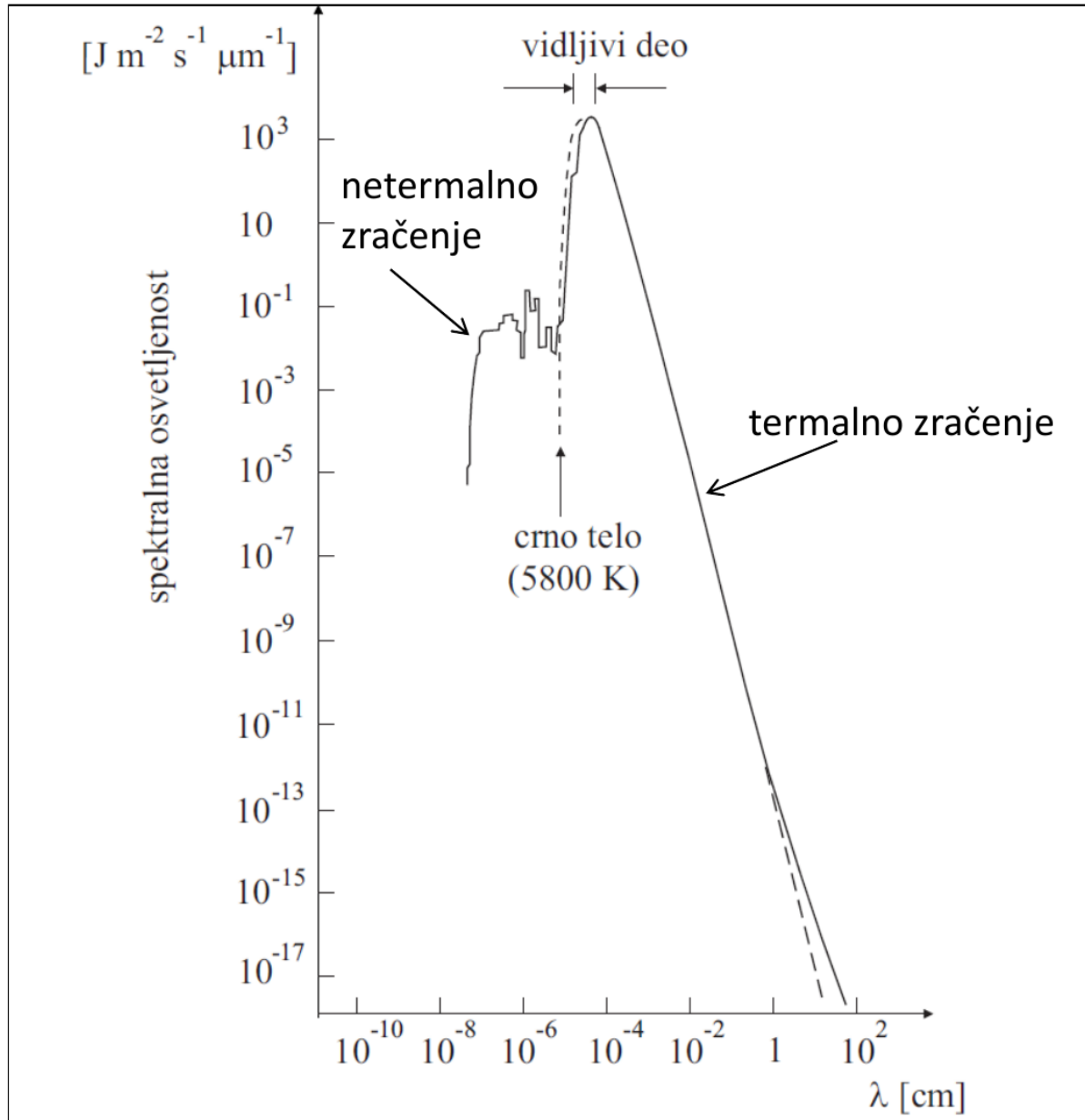
$$F_\nu = \lim_{\Delta t, \Delta \nu, \Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta E_\nu}{\Delta t \Delta \nu \Delta S}$$

[W m⁻² Hz⁻¹]



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

Spektralna raspodela Sunčevog zračenja



Zvezde

- Tokom najvećeg dela svog života zvezde su stabilna, usijana nebeska tela u stanju plazme, koja emituju zračenje zahvaljujući sopstvenom izvoru energije – **termonuklearnim reakcijama** koje se dešavaju u njihovom jezgru.
- Zvezde prolaze i kroz faze nestabilnosti kada **gravitaciono sažimanje** postaje značajan izvor energije.
- Zvezdama nazivamo i neke **konačne faze** u njihovoj evoluciji – **bele patuljke i neutronske zvezde**, sačinjene od superguste materije, koje ne poseduju više nikakve izvore energije.

Karakteristike zvezda

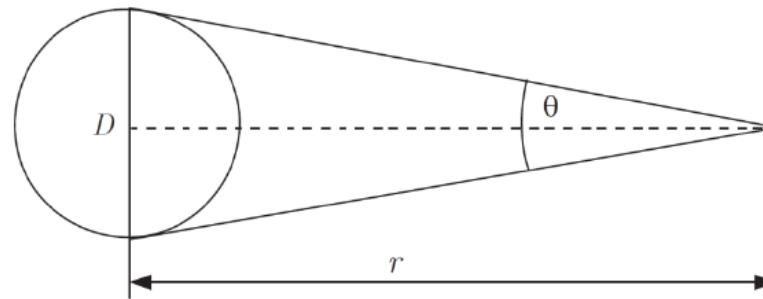
Osnovni fizički parametri koji karakterišu zvezdu:

- masa
- sjaj (luminoznost)
- temperatura
- radijus

Rastojanja do zvezda

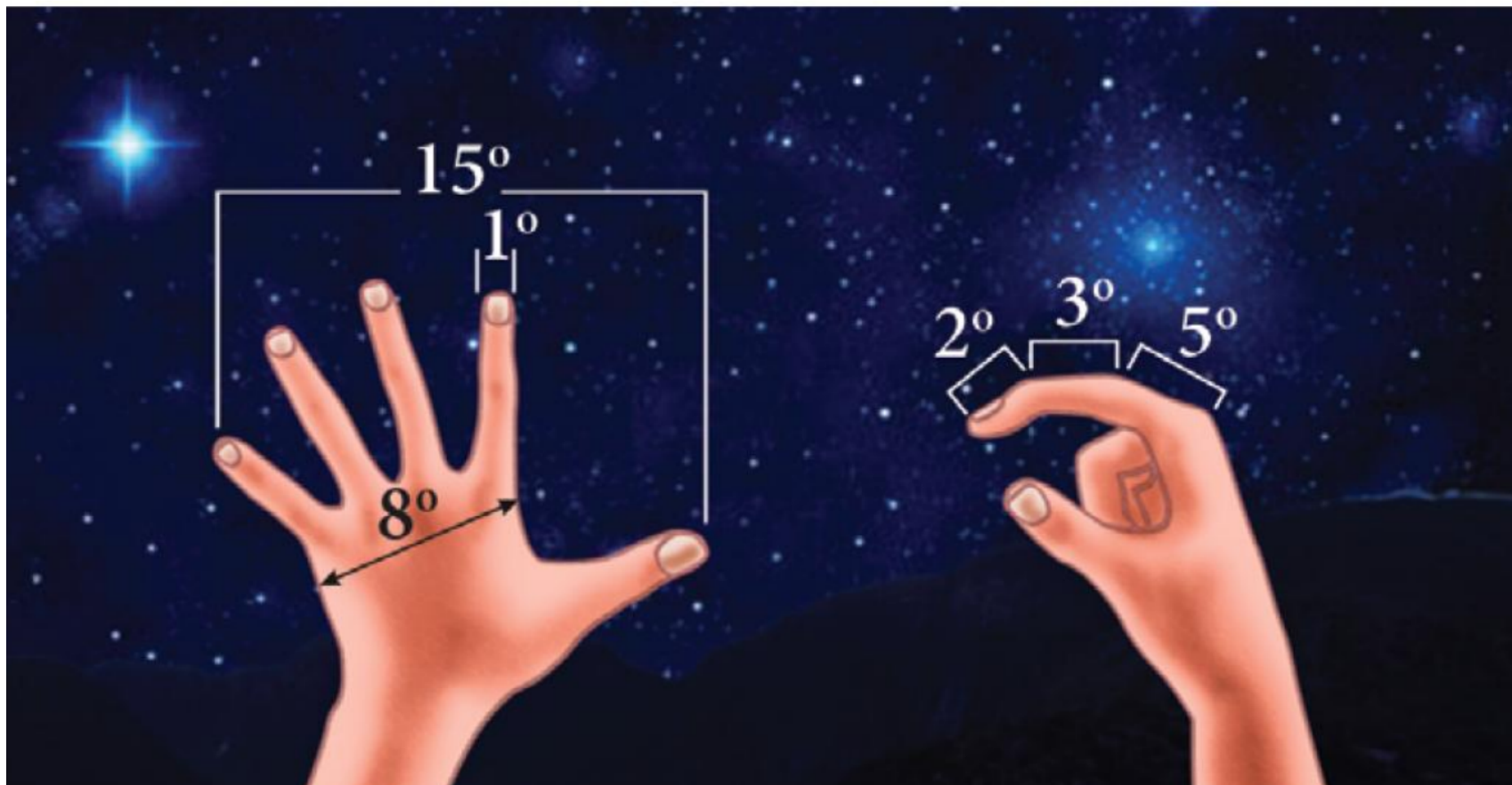
- Da bi se odredili osnovni parametri koji karakterišu zvezde neophodno je poznavati rastojanja do zvezda.

Primer: odredjivanje prečnika zvezde iz njenog ugaonog prečnika i rastojanja

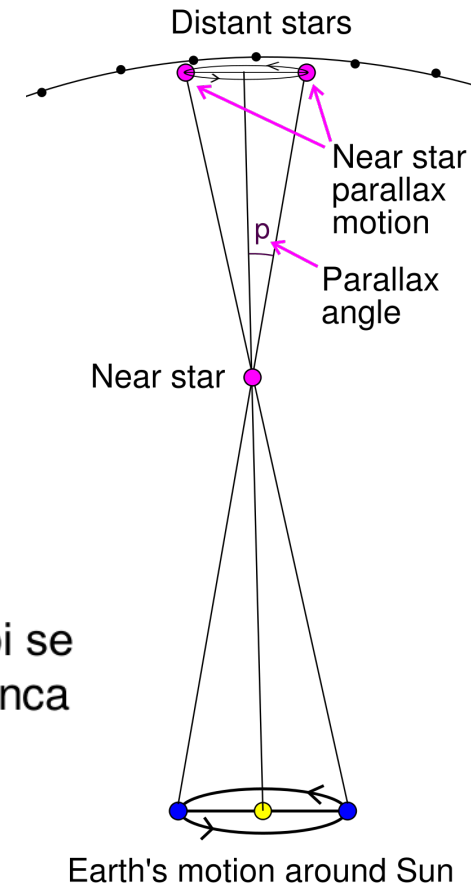
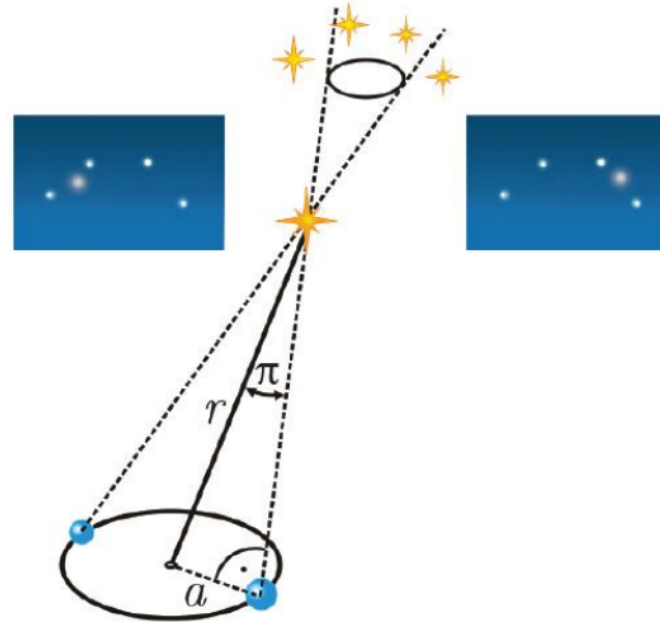
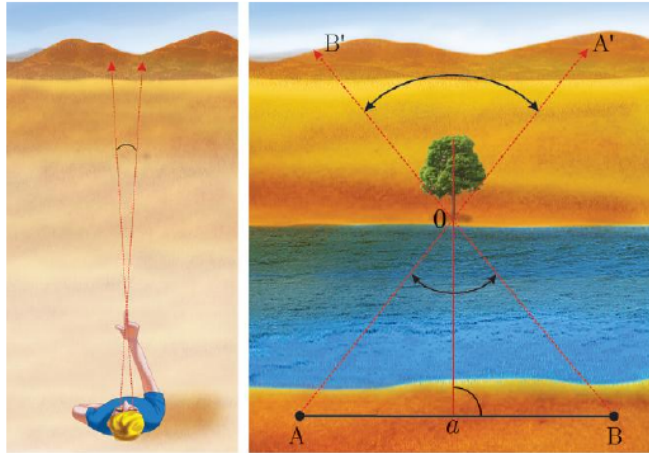


- Odredjivanje daljina zvezda i drugih nebeskih tela je jedan od najtežih problema u astronomiji.
- Prvi, direktni i najtačniji metod odredjivanja rastojanja do zvezda je **metod trigonometrijske paralakse**.

Približna procena uglova na nebu



Metod trigonometrijske paralakse



Godišnja ili trigonometrijska paralaksa (π) zvezde je najveći ugao pod kojim bi se sa zvezde (na heliocentričnom rastojanju r) video radijus Zemljine putanje oko Sunca (a), normalno na pravac Zemlja – zvezda. Traženo heliocentrično rastojanje r je

$$r = \frac{a}{\sin \pi} = \frac{206\,265a}{\pi["]}$$

Prvu paralaksu jedne zvezde (61 Cygni) izmerio je **Besel** 1838. godine.

JEDINICE ZA DAJINE

- 1 A.J. = 149 597 870 km (srednje rastojanje Sunce - Zemlja)
(za rastojanja u S. sistemu)
- 1 pc /paralaksa - sekunda/ je rastojanje koje odgovara
godišnjoj paralaksi od 1" :

$$r[\text{pc}] = \frac{1}{\pi["]}$$

$$r[\text{A.J.}] = \frac{206265}{\pi["]}$$

$$\underline{1 \text{ pc} = 206265 \text{ A.J.} = 3.0857 \cdot 10^{13} \text{ km}}$$

$$r = \frac{a}{\sin \pi} = \frac{206265a}{\pi["]}$$

$$1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc} ; \quad 1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$$

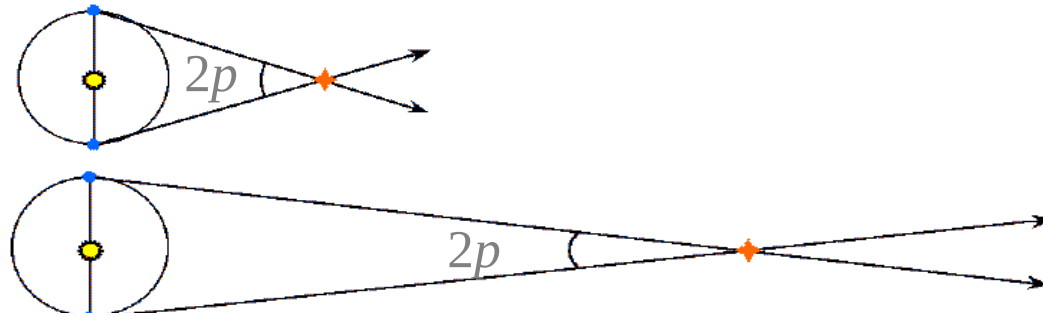
- 1 sv. god. je rastojanje koje pređe svetlost za godinu
dava putujući konstantnom brzinom od 300.000 km/s

$$\underline{1 \text{ pc} = 3.26 \text{ sv. god.}}$$

Paralakse i daljine do najbližih zvezda

Zvezda	$\pi[']$	r[pc]	r[sv. god.]
α Centauri	0.75	1.3	4.3
Sirius	0.38	2.6	8.6
61 Cygni	0.29	3.4	11.1

Paralaksa opada sa rastojanjem



**Najbliža zvezda
je 270000 puta dalja od Sunca !**

Proxima Centauri

(komponenta trojnog sistema α Centauri)

$$\pi = 0.''7687 \pm 0.''003$$

$$r = 1,30\text{pc} = 4,24\text{ sv.god.}$$

Odredjivanje rastojanja do zvezda i drugih nebeskih tela - **jedan od najvećih problema u astronomiji!**

Kosmičke astrometrijske misije

(položaji, paralakse, sopstvena kretanja)

- **HIPPARCOS** (High Precision Parallax Collecting Satellite) (ESA) – prva astrometrijska misija namenjena merenju položaja zvezda (1989–1993)

Katalog **120000 zvezda** do 12.4 magnitude, **tačnost 2 mas (0.002")**

- **GAIA (ESA)** – najtačniji optički astronomski satelit, lansiran 19.12.2013. na 1.5 miliona km od Zemlje (oko Lagranžove tačke L_2)

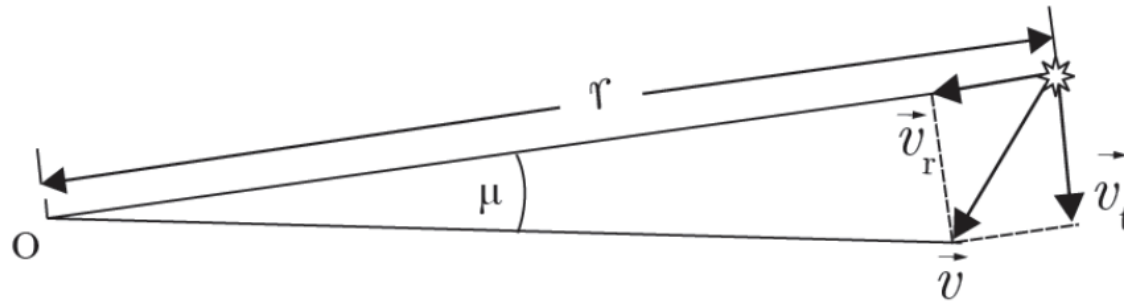
Osnovni ciljevi GAIA-e:

- katalog položaja, paralaksi i sopstvenih kretanja oko **milijardu zvezda** do 20. magnitude sa **tačnošću od 200 μ as ($\pi > 0,0002''$)**,
- rastojanja do 20 miliona zvezda sa tačnošću od 1% i do 200 miliona zvezda sa tačnošću 10%,
- spektrofotometrijska merenja i **merenja radijalnih brzina**,
- detekcija do 500000 kvazara.

Kretanje zvezda

Prostorna brzina zvezde i njene komponente:

- radijalna brzina v_r (u pravcu vizure)
- tangencijalna brzina v_t (normalno na pravac vizure)



$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$$

Radialna brzina zvezde

(komponenta brzine zvezde u pravcu vizure)

odredjuje se merenjem pomaka linija u spektru zvezde i korišćenjem Doplerovog obrasca

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}$$

$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ je razlika talasnih dužina registrovanog i emitovanog zračenja

Pri kretanju tela velikim (relativističkim) brzinama, relativna promena talasne dužine

$$z = \Delta\lambda / \lambda_0$$

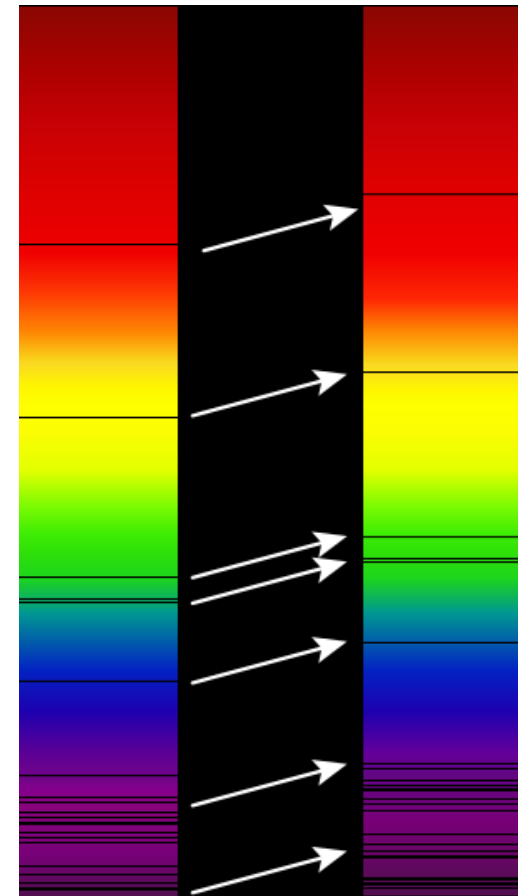
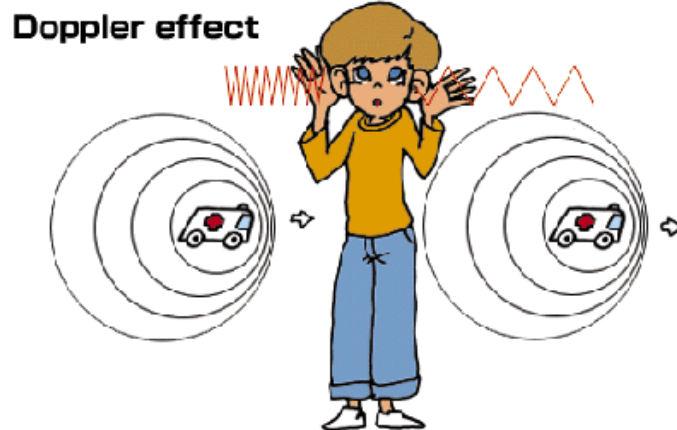
data je relativističkim izrazom za Doplerov efekat

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 + v_r / c}{1 - v_r / c}} - 1 \quad \Rightarrow \quad v_r = c \frac{(z + 1)^2 - 1}{(z + 1)^2 + 1}$$

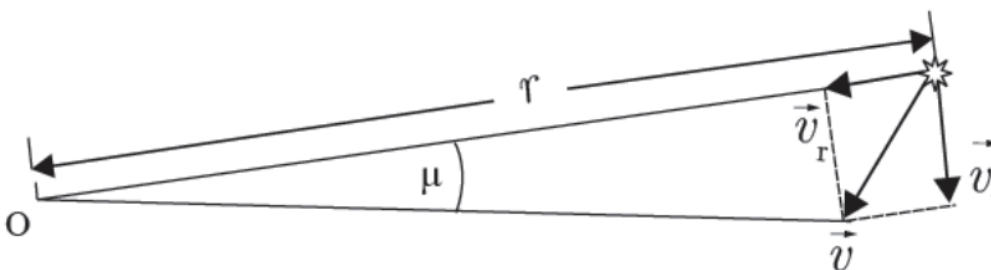
Доплеров ефекат је појава да услед релативног кретања пријемника или извора долази до **мењања фреквенције таласа**.

Ако се пријемник и предајник крећу један ка другом, фреквенција се помера навише (расте), а ако се пријемник и предајник крећу један од другог, фреквенција се помера наниже (опада).

На пример, Доплеров ефекат можемо приметити на ауто-путу: бука коју мотор аутомобила прави док нам се приближава другачија је од оне коју чујемо док се од нас удаљава.



Tangencijalna brzina zvezde



TANGENCIJALNA BRZINA I SOPSTVENO KRETANJE

SOPSTVENO KRETANJE (μ) = PROMENA PRAVCA U KOME VIDIMO ZVEZDU u toku JEDNE GODINE [$''/\text{god}$]

$$\mu^2 = (\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2$$

NAJVEĆE SOPSTVENO KRETANJE IMA BARNARDOVA ZVEZDA

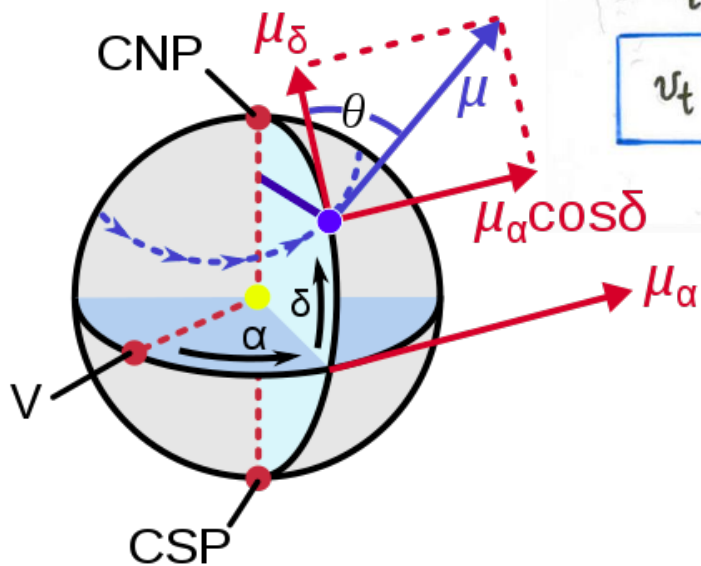
$$\mu = 10.''39/\text{god}$$

$$v_t = r \cdot \tan \mu \approx r \cdot \mu = \frac{206265 [\text{A.J.}]}{\pi [']} \cdot \frac{\mu [''/\text{god}]}{206265} = \frac{\mu}{\pi} \left[\frac{\text{A.J.}}{\text{god}} \right]$$

$$v_t = 4.74 \frac{\mu}{\pi} \left[\frac{\text{km}}{\text{s}} \right]$$

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$$

$$v_r, \mu, \pi \Rightarrow v$$



Ne radimo:
Na duže staze se usled sopstvenog kretanja menja izgled sazvežđa

Prividni sjaj zvezde – sjaj zvezde koji vidi posmatrač na Zemlji

Posmatrani (prividni) sjaj se izražava u tzv. **prividnim zvezdanim veličinama (magnitudama)** – m (Hiparh, II vek pre n.e.)

Zavisi od:

- količine energije koju zvezda emituje u jedinici vremena (njenog stvarnog sjaja),
- njenog rastojanja i
- količine međuzvezdane materije na putu od zvezde do posmatrača

Pogson (1856): geometrijskoj progresiji osvetljenosti odgovara aritmetička progresija prividnih zvezdanih veličina

$$\frac{E_1}{E_2} = C^{-(m_1 - m_2)} \quad \Rightarrow \quad m_1 - m_2 = \frac{1}{\log C} \log \frac{E_2}{E_1}$$

Reakcija čula proporcionalna je logaritmu jačine nadražaja.

1) Odnos osvetljenosti od dve zvezde koje se po sjaju razlikuju za jednu magnitudu je konstantan:

$$\frac{E_m}{E_{m+1}} = C$$

2) $\frac{E_1}{E_6} = 100 = C^5 \quad \Rightarrow \quad \log C = 0.4; \quad C = 2.512$

Pogsonov zakon

$$m_1 - m_2 = 2.5 \cdot \log \frac{E_2}{E_1}$$

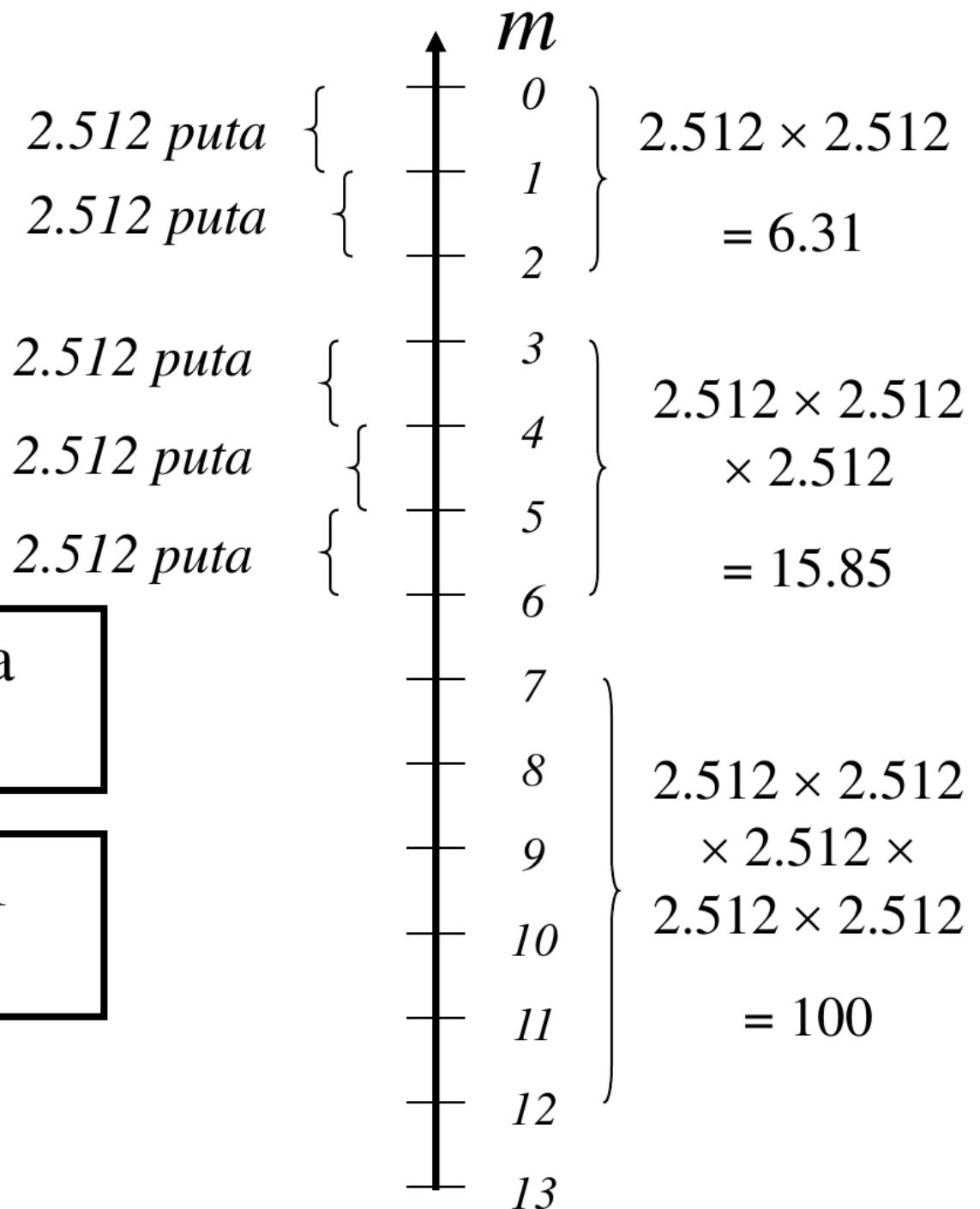
Inverzna logaritamska skala

Prividna
magnituda i
odnos flukseva
(osvetljenosti)

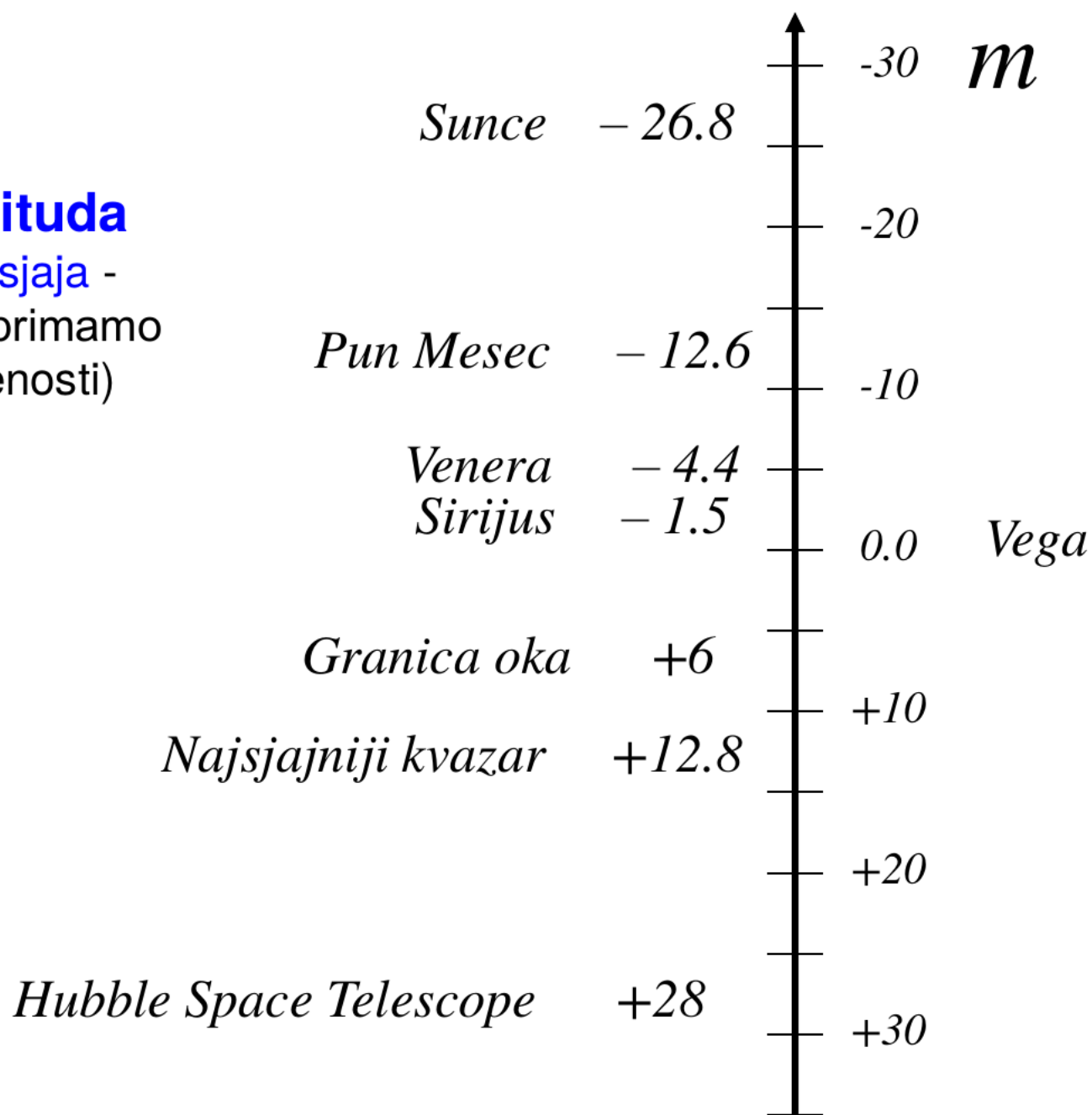
Za 5 manja magnituda
= $100 \times$ veći sjaj

Magnituda manja za 1
 $\approx 2.512 \times$ veći sjaj

$$\sqrt[5]{100} = 2.512...$$



Prividna magnituda
je mera prividnog sjaja -
fluksa zračenja koji primamo
na Zemlji (osvetljenosti)



Granična magnituda vidljivosti ljudskim okom – oko 6 magnitude

CCD kamera ima mogućnost akumulacije svetlosti – duge ekspozicije

Svetlosno zagađenje u naseljenim mestima – loši uslovi za
posmatranje

Zvezde koje vidimo golim okom noću pripadaju našoj galaksiji!!!

Sistemi magnituda

Postoji više vrsta (sistema) magnituda definisanih osetljivošću mernog instrumenta na odredjeni opseg talasnih dužina

$$m_{\lambda} = \text{const} - 2,5 \log F_{\lambda}$$

Rezultat merenja sjaja zvezde (izražen magnitudama) je različit zavisno od toga u kom delu njenog spektra merimo sjaj.

- | | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| • vizuelne magnitude | m_v | (λ 550 nm) |
| • fotografske magnitude | m_{pg} | (λ 430 nm) |
| • fotovizuelne magnitude | $m_{pv} \approx m_v$ | |

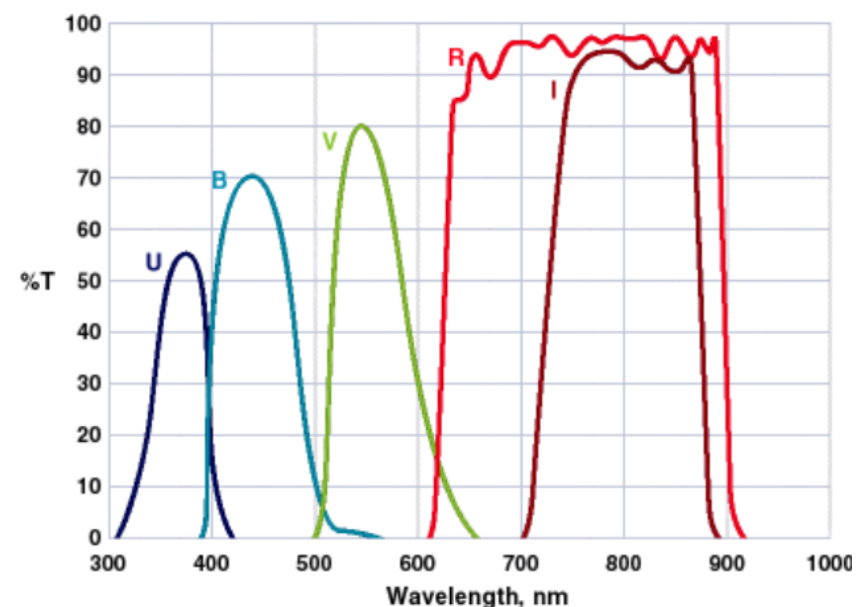
- **Fotometar** je instrument za merenje osvetljenosti, tj. prividnih zvezdanih veličina
 - Fotometri su osetljivi samo unutar određenog (izabranog) intervala talasnih dužina
 - Filteri + osetljivost fotometra

➡ specifična prividna magnituda.



- Postoje razni **fotometrijski sistemi**:
 - **UBV** Johnson-ov sistem (široko-pojasni sistem)
 - **UBVRI** (uključuje crveni i infracrveni deo spektra).

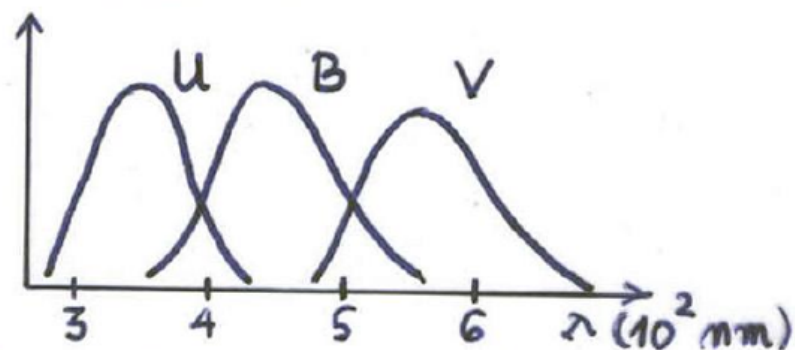
Filtar	Opseg	Maksimum
U (ultraljubičasti)	300–400 nm	365 nm
B (plavi)	360–550 nm	440 nm
V (vizuelni)	480–680 nm	550 nm



UBV fotometrijski sistem

- FOTOELEKTRIČNI FOTOMETAR $\Rightarrow$ **UBV SISTEM** (Johnson)

<u>FILTER</u>	<u>OPSEG (nm)</u>	<u>MAXIMUM (nm)</u>
U	300-400	365
B	360-550	440
V	480-680	550



U, B, V (m_U, m_B, m_V) $\rightarrow$ 2 boje : U-B , B-V

$$CI = B - V$$

INDEX BOJE (SAVREMENA
DEFINICIJA)

- UBV SISTEM JE PROŠIREN SA MAGNITUDAMA NA CRVENIM I INFRACRVENIM TALASNIM DUŽINAMA:
R(700 nm), I(0.9 μ m), J(1.25 μ m), H(1.6 μ m), K(2.2 μ m),
L(3.4 μ m), M(5 μ m), N(10.2 μ m), Q(21 μ m).

Indeks boje

Razlika izmedju sjaja zvezde merenog u dva sistema magnitude govori nam o boji i temperaturi zvezde.

Razlika izmedju fotografske i vizuelne zvezdane veličine - **indeks boje (color index)** :

$$CI = m_{pg} - m_v$$

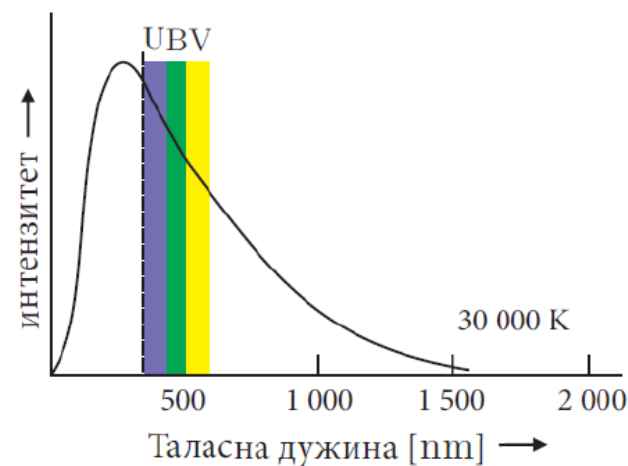
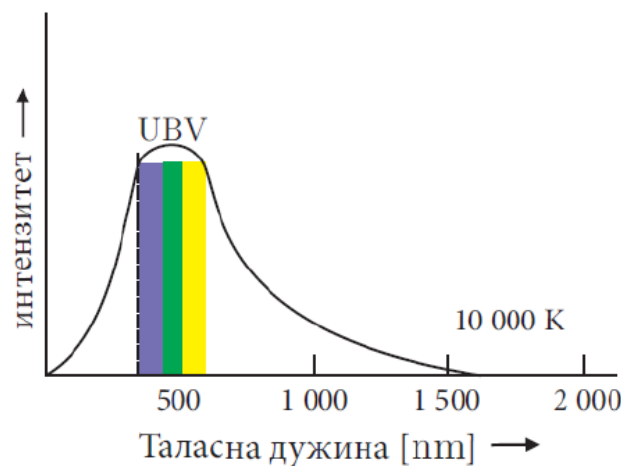
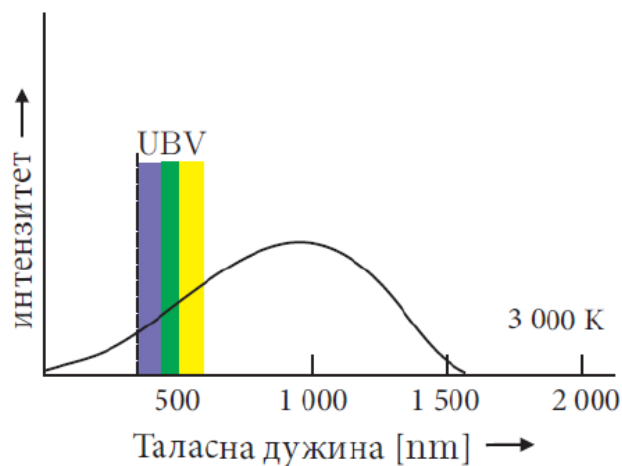
$$CI = 0 \text{ za } T = 10000 \text{ K}$$

$$CI > 0 \text{ za } T < 10000 \text{ K}$$

$$CI < 0 \text{ za } T > 10000 \text{ K}$$

Fotoelektrična fotometrija - **fotoelektrične magnitude (U,B,V)** i **savremena definicija indeksa boje**:

$$CI = B - V$$



Apsolutna magnituda (M) je mera stvarnog sjaja zvezda

BROJNO JE JEDNAKA PRIVIDNOJ MAGNITUDI KOJU BI ZVEZDA
IMALA KADA BI SE NALAZILA NA RASTOJANJU OD 10 pc

$$m - M = 2.5 \log \frac{E_M}{E_m} = 2.5 \log \frac{\frac{I}{r_{10}^2}}{\frac{I}{r^2}} = 2.5 \log \left(\frac{r}{r_{10}} \right)^2$$

$$E \propto \frac{1}{r^2} ; \quad r_{10} = 10 \text{ pc}$$

$$m - M = 5 \log \left(\frac{r}{10} \right) = 5 \log r - 5 \quad \text{/MODUL RASTOJANJA/}$$

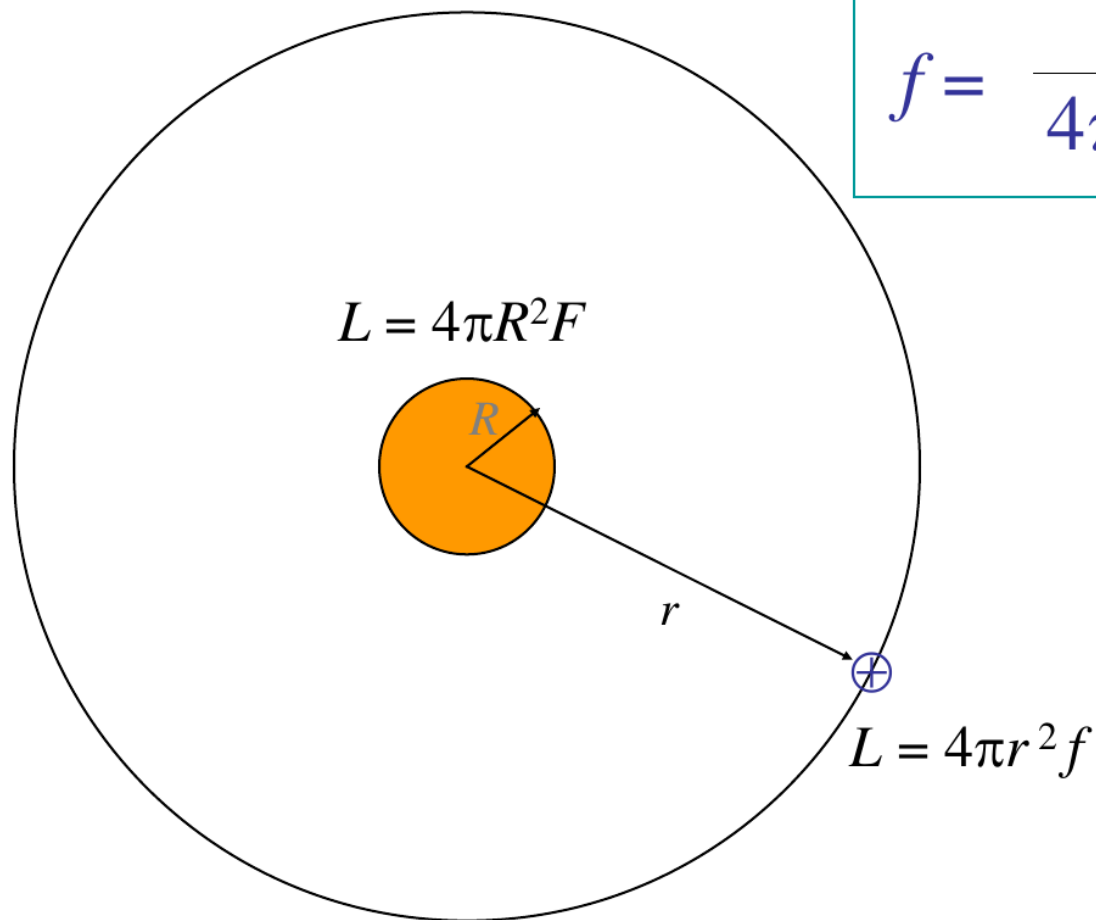
$M = m + 5 - 5 \log r$
$M = m + 5 + 5 \log \pi$

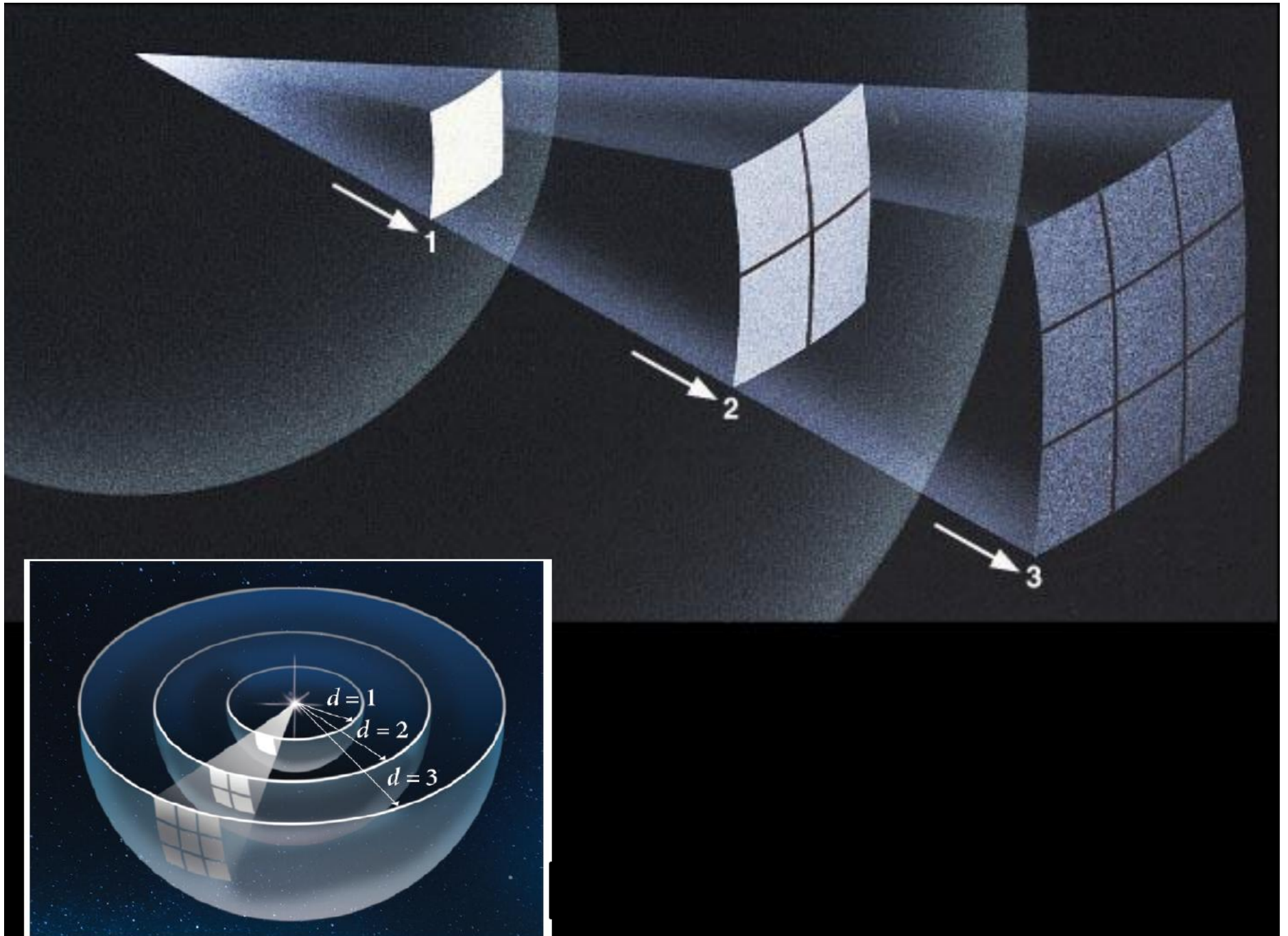
$$r [\text{pc}]$$

$$\pi ["]$$

Priljubljeni fluks zračenja f je obrnuto proporcionalan kvadratu rastojanja od izvora

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}$$





Luminoznost zvezde



$$L = 4\pi R^2 \cdot F(R) = 4\pi r^2 \cdot F(r)$$

$$\downarrow$$

$$\underline{F(r) = \frac{L}{4\pi r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot F(R)}$$

$$E(r) = \frac{F(r)}{S}$$

$$\text{za } S=1 : E(r) = F(r)$$

$$\underline{m = \text{const} - 2.5 \log F(r) = \text{const} - 2.5 \log \frac{L}{4\pi r^2}}$$

$$\underline{\underline{m = \text{const}' + 5 \log r - 2.5 \log L}}$$

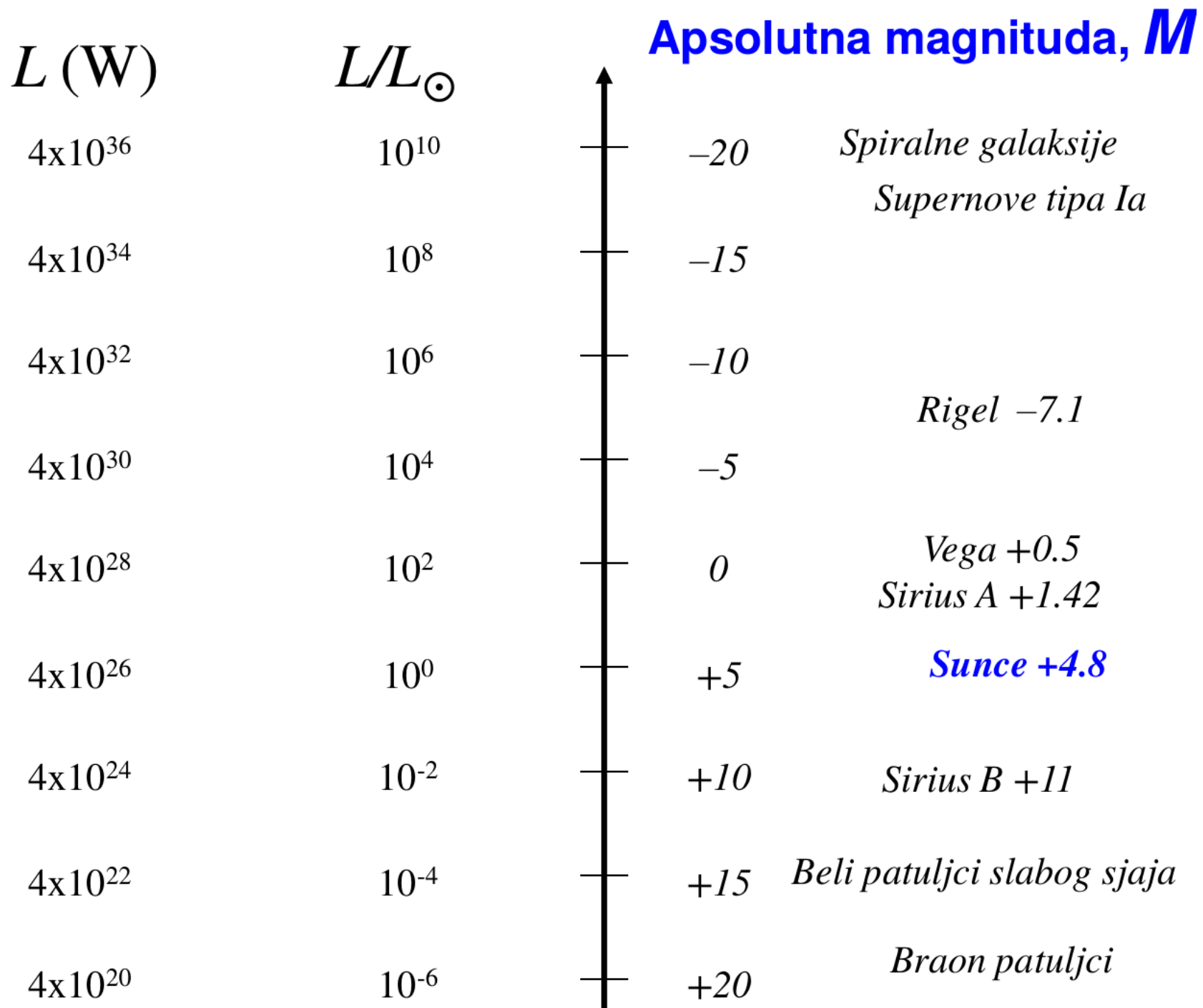
$$M = m(r=10\text{pc})$$

$$\underline{\underline{M = \text{const}' + 5 - 2.5 \log L}}$$

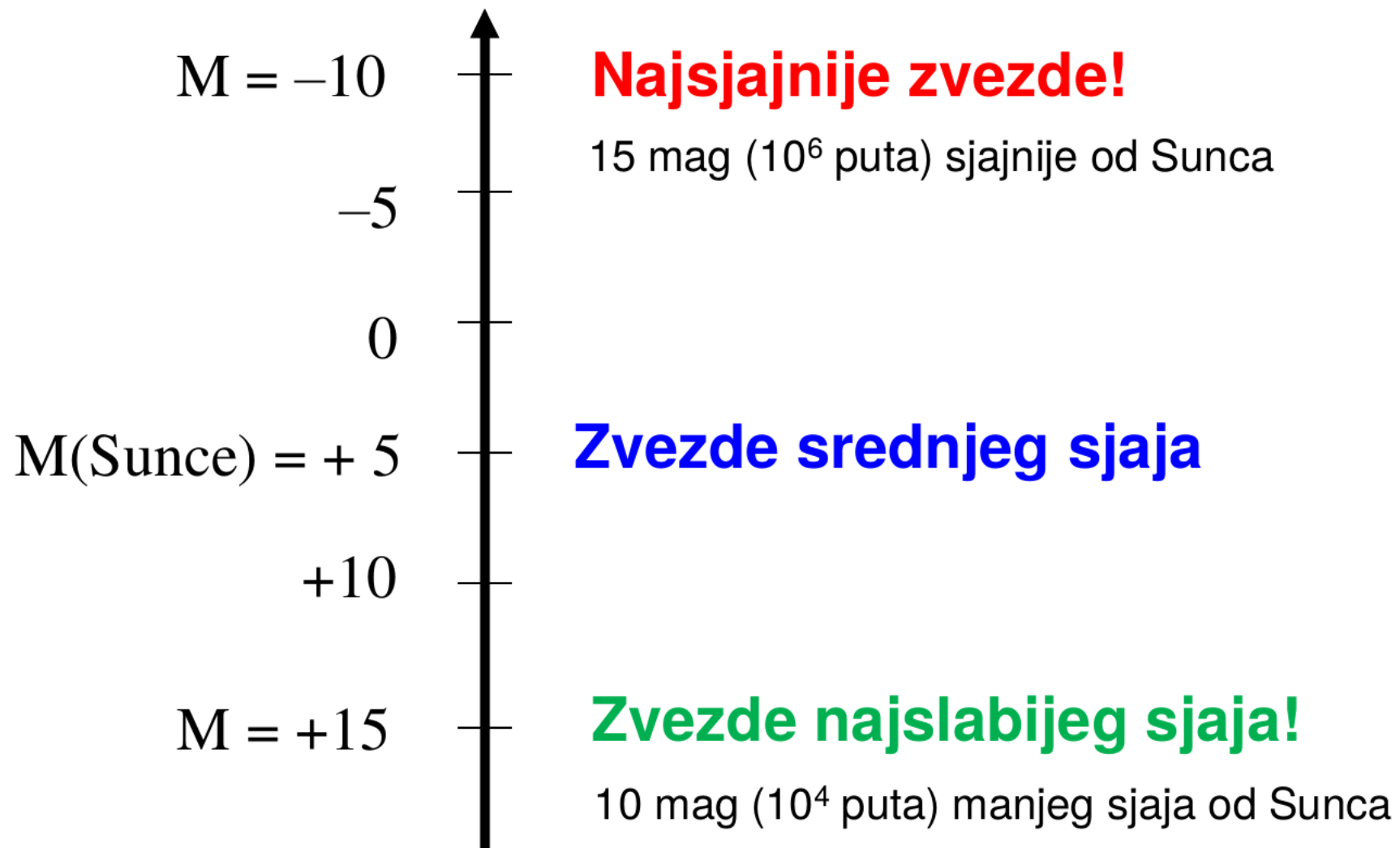
$$\left. \begin{array}{l} m = \text{const}' + 5 \log r - 2.5 \log L \\ M = \text{const}' + 5 - 2.5 \log L \end{array} \right\} m - M = 5 \log r - 5$$

$$\boxed{M = \text{const}'' - 2.5 \log L}$$

$$\Rightarrow \boxed{M_1 - M_2 = 2.5 \log \frac{L_2}{L_1}}$$



Opseg apsolutnih magnituda za zvezde



Веза физичких и астрономских величина

осветљеност E [W/m²] → привидни сјај m

луминозност L [W] → апсолутни сјај M

Веза осветљености E коју даје звезда на растојању r и њене луминозности L је:

$$E = \frac{L}{4\pi r^2}.$$

$$m_1 - m_2 = 2,5 \log \frac{E_2}{E_1}$$

$$E = \frac{I}{r^2}$$

$$M = m + 5 - 5 \log r$$

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

$$M_1 - M_2 = 2,5 \log \frac{L_2}{L_1}$$

Bolometrijska zvezdana magnituda

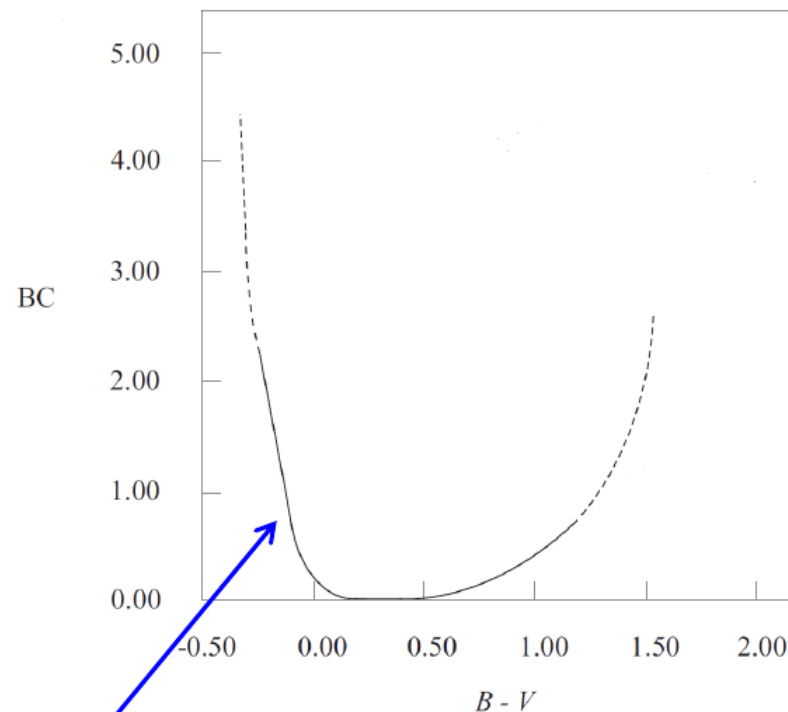
m_{bol} odnosno M_{bol}

Bolometrijska korekcija (BC)

$$m_{\lambda} = \text{const} - 2,5 \log F_{\lambda}$$

$$m_{\text{bol}} = m_V - \text{BC}$$

$$M_{\text{bol}} = M_V - \text{BC}$$



Bolometrijska korekcija je mera razlike ukupne energije koju izrači zvezda i energije koju izrači u vidljivoj oblasti. Bliska je nuli za zvezde čiji je maksimum izračene energije u vidljivom delu spektra ($5500\text{K} < T_{\text{ef}} < 9500\text{K}$). Određuje se pomoću empirijski ustanovljene krive BC vs. B-V.

$$M_1 - M_2 = 2.5 \log \frac{L_2}{L_1} \quad \Rightarrow$$

$$M_{\text{bol}*} = 4.74 - 2.5 \log \frac{L_*}{L_{\odot}}$$