

# Zračenje nebeskih tela

# Prikupljanje informacija

- ▶ Direktno
  - ▶ Ljudska posada, sonde, roboti itd.
  - ▶ Analiza materijala koji je pao na Zemlju (meteoriti itd.)
- ▶ Posmatranje kretanja
  - ▶ Gravitacioni efekti
- ▶ Analiza elektro-magnetnog zračenja (svetlosti)

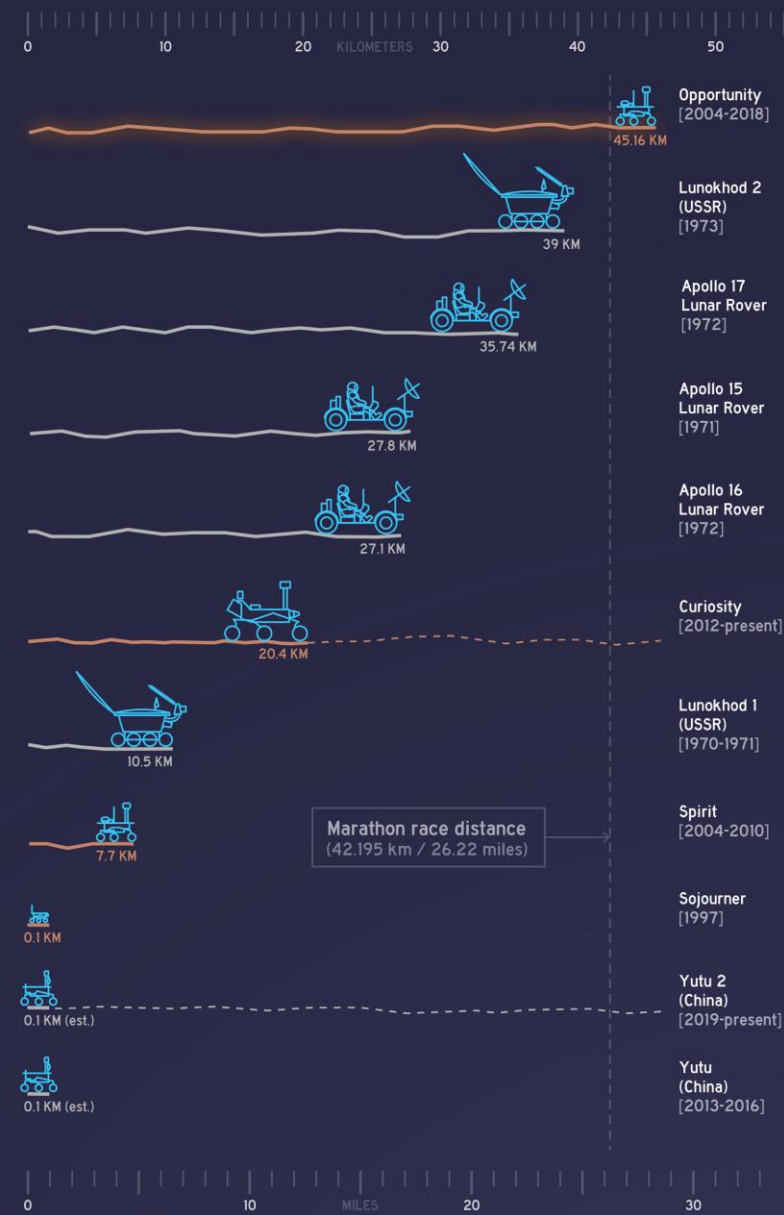
# Direktne informacije

- ▶ Ljudska posada
- ▶ Sonde
- ▶ Materijal na Zemlji

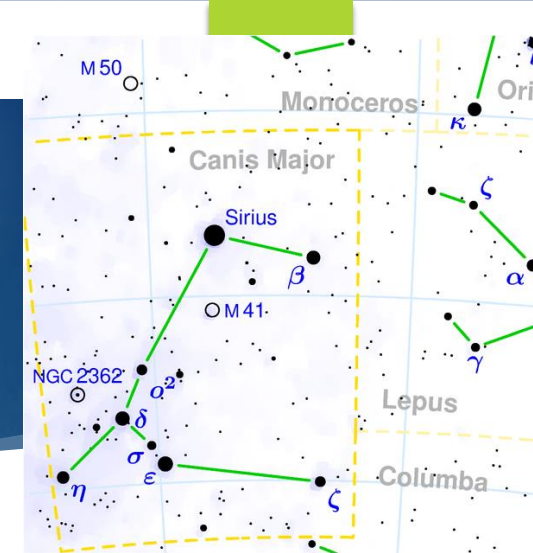


## OUT-OF-THIS-WORLD RECORDS! DRIVING DISTANCES ON MARS AND THE MOON

(AS OF FEBRUARY 13, 2019)  
MARS — MOON —



# Gravitacioni efekti



- ▶ Primena Keplerovih zakona, Njutnovog zakona gravitacije, Ajnštajnovog OTR

- ▶ Masa, elementi orbita, kretanje – na osnovu poremećaja u kretanju

- ▶ Otkriće zvezde Sirijus B (pratilac najsjajnije zvezde Sirijus)

- ▶ Rastojanje 8,8 svetlosnih godina, 1,8 puta veći od Sunca

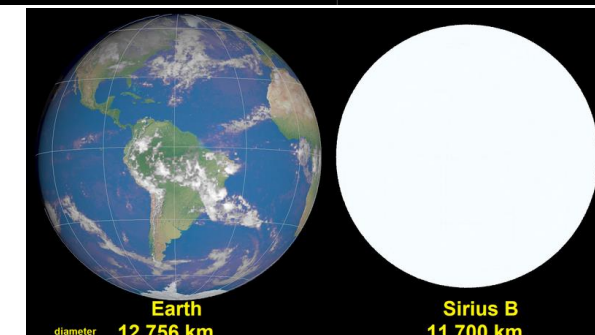
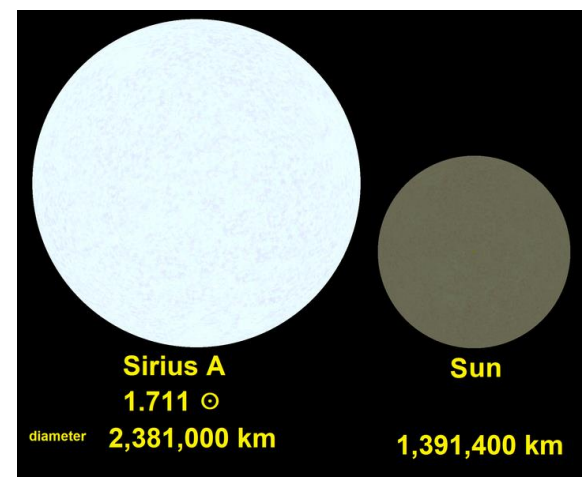
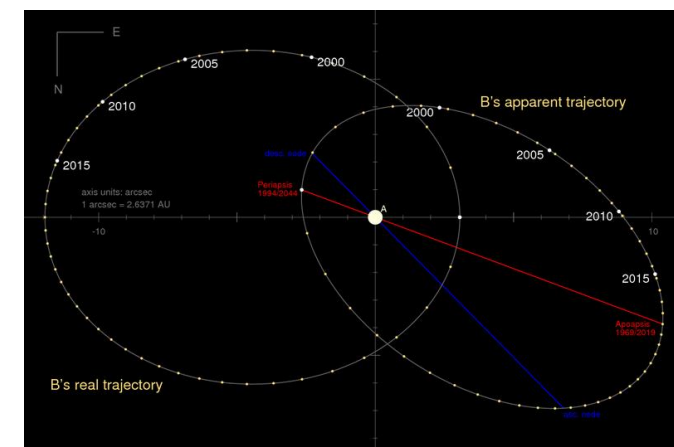
- ▶ Udaljava brzinom od 8 km/s

- ▶ F.W Besel (1844), višegodišnje praćenje

- ▶ Sirijus – menja položaj, blago zatalasana putanja

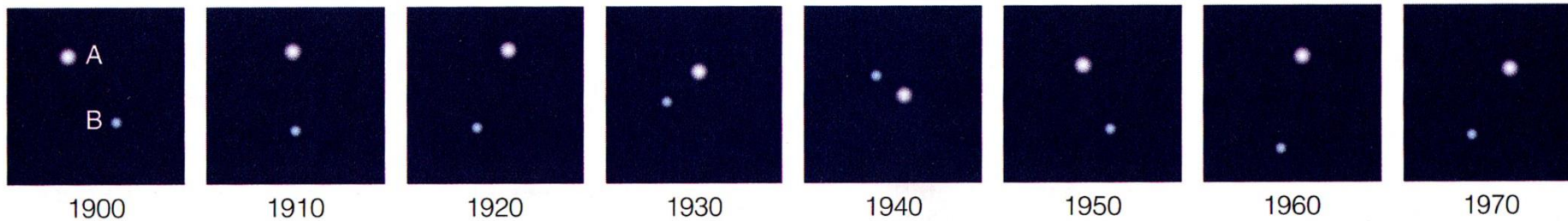
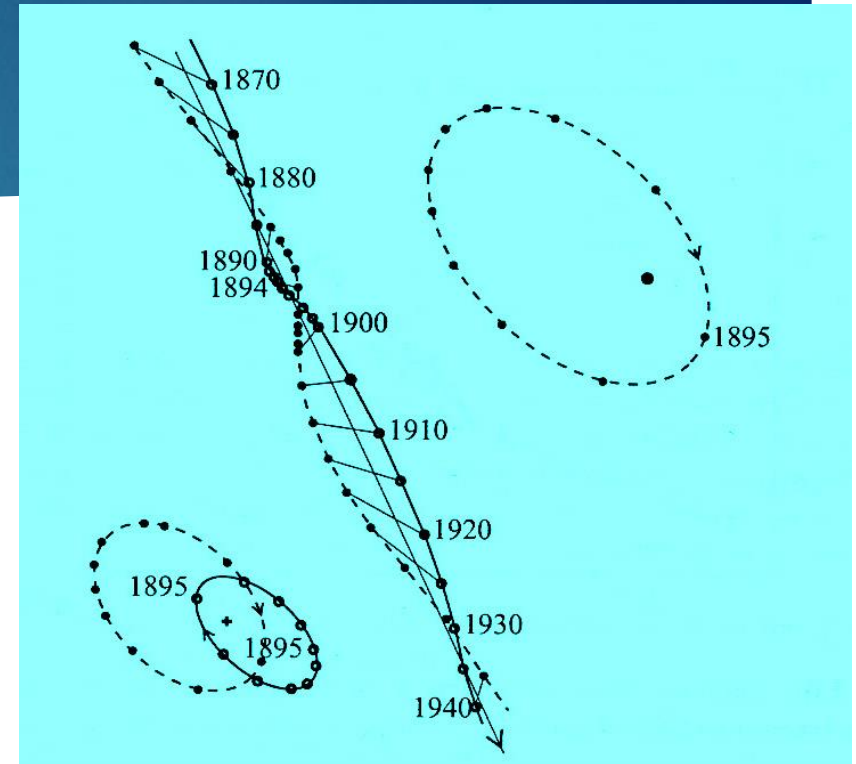
- ▶ Pretpostavka – gravitaciono delovanje nepoznatog pratioca

- ▶ Period – 49,7 godina



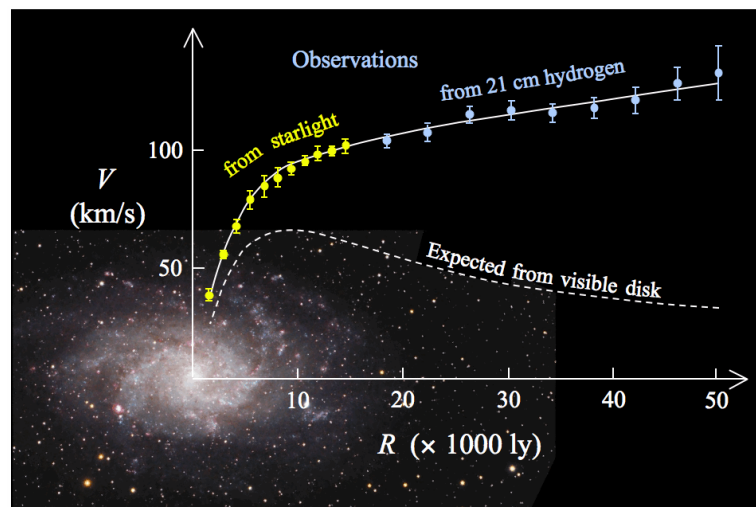
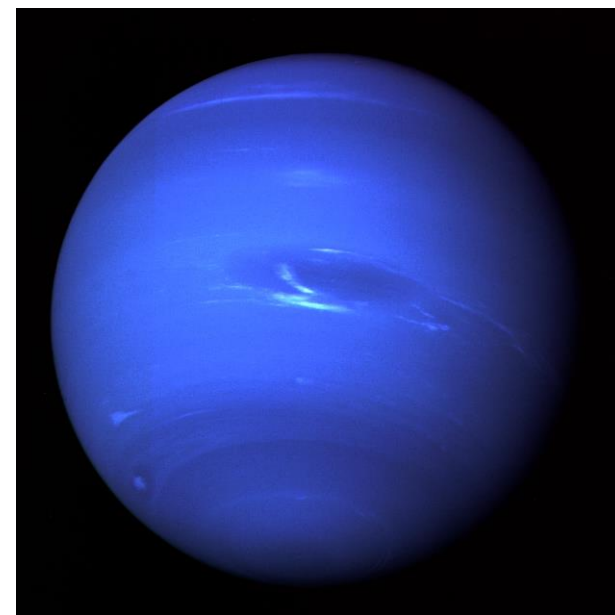
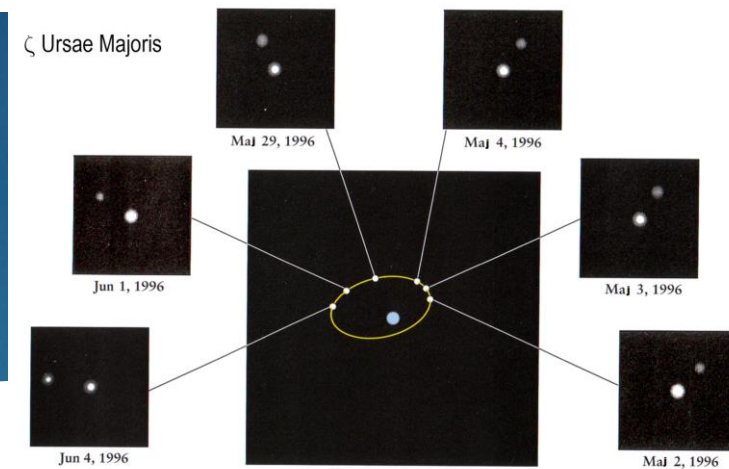
# Gravitacioni efekti

- ▶ E. Klark (januar 1862) – na  $10''$  od Sirijusa slaba zvezda
  - ▶ Patuljasta zvezda Sirijus B, ogromna gustina ali gasovita
  - ▶ Centar mase (baricentar) kreće po pravoj liniji, komponente oko njega



# Gravitacioni efekti

- ▶ Slično ponašanje kod zvezde Zeta Ursae Majoris
- ▶ Ne samo zvezde:
  - ▶ npr. otkriće planete Neptun (matematičko predviđanje na osnovu efekata na orbiti Urana)
- ▶ (van)Galaktička astronomija?
  - ▶ Tamna materija
  - ▶ Neutronske zvezde
  - ▶ Crne rupe
  - ▶ Aktivne galaksije itd



# Zračenje nebeskih tela

- ▶ Dž. Maksvel – svetlost = elektromagnetni talas
- ▶ Na osnovu emitovane/reflektovane svetlosti mogu se dobiti podaci o položaju i kretanju tela, hemijskom sastavu, temperaturi, pritisku, jačini polja, strukturi

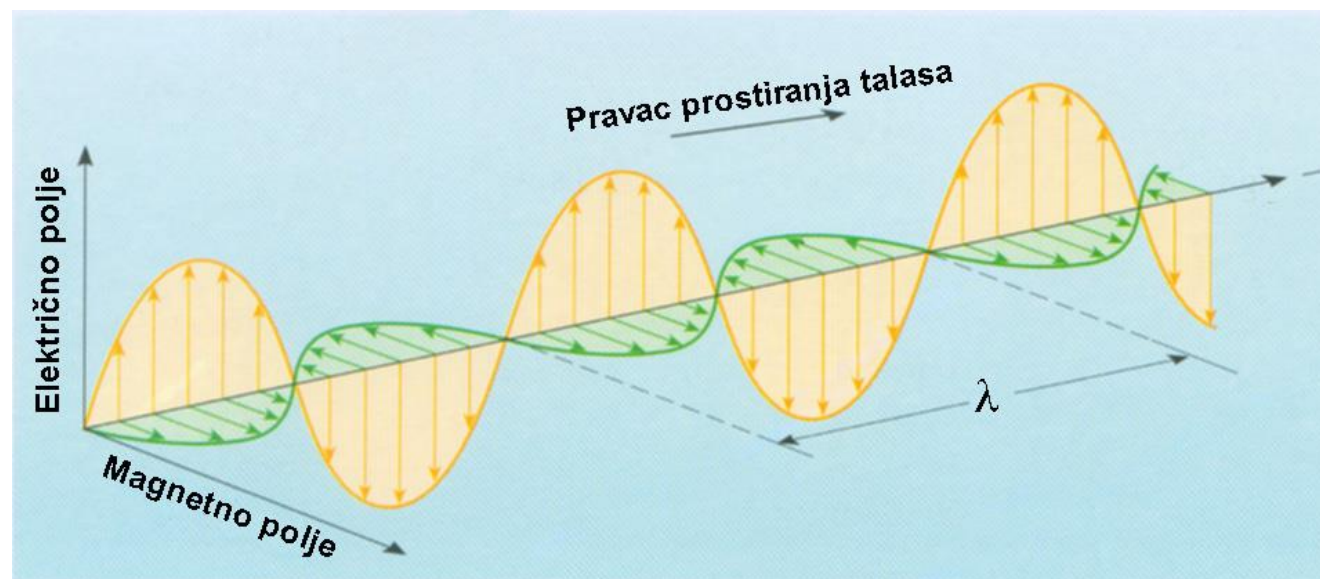
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

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

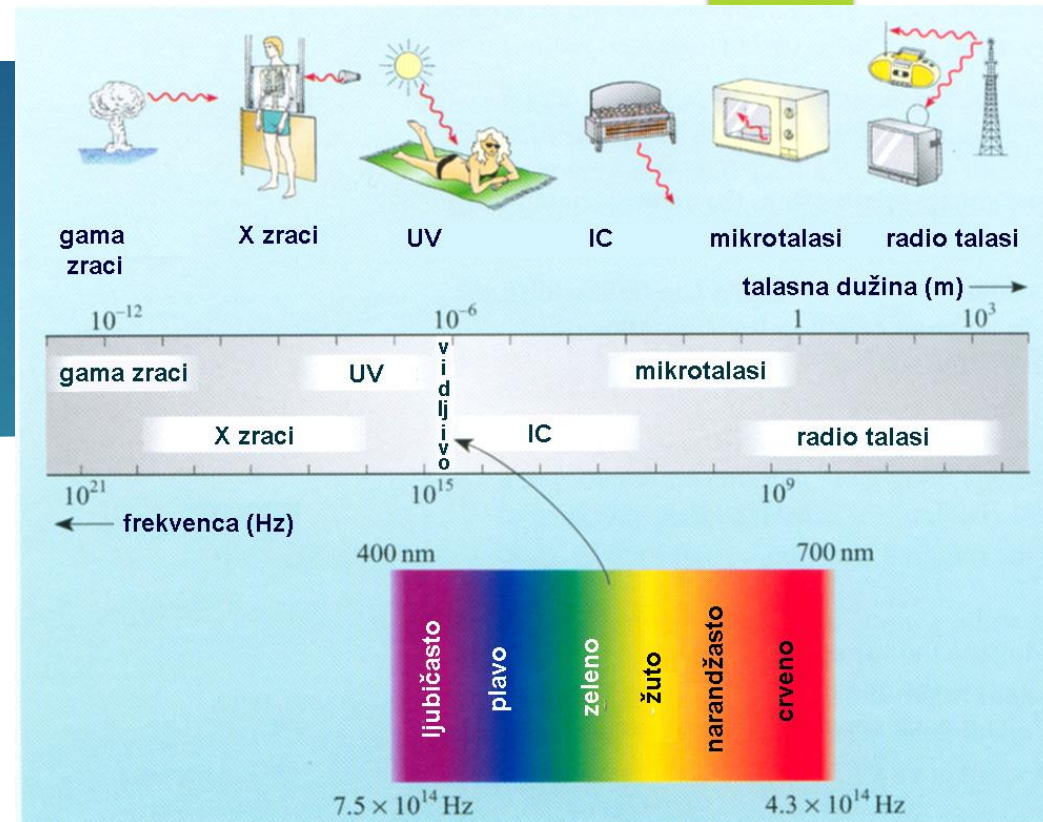
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

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

*J. Clerk Maxwell*

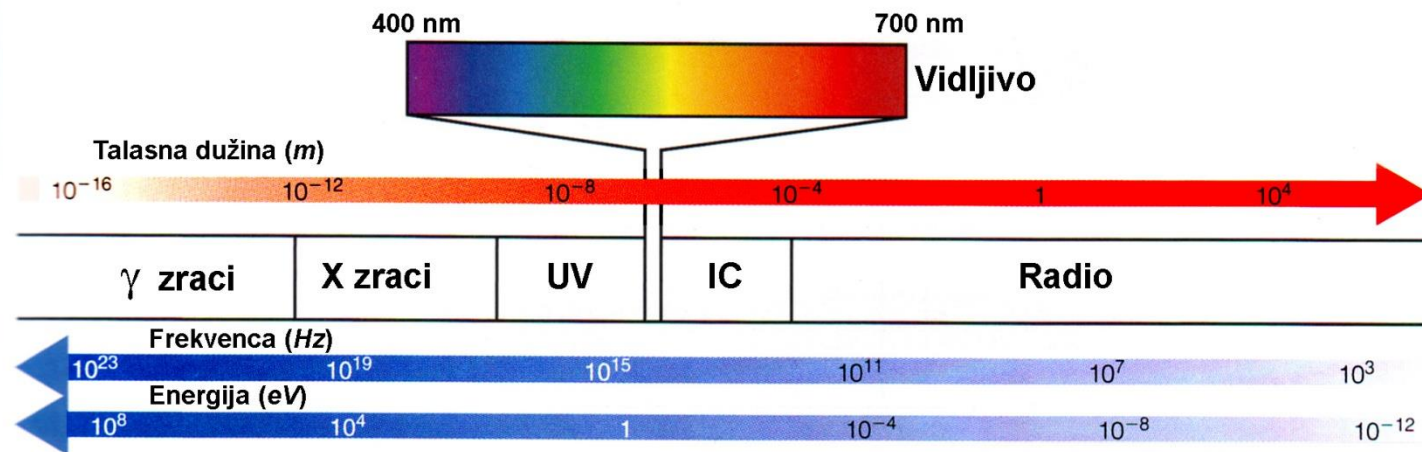
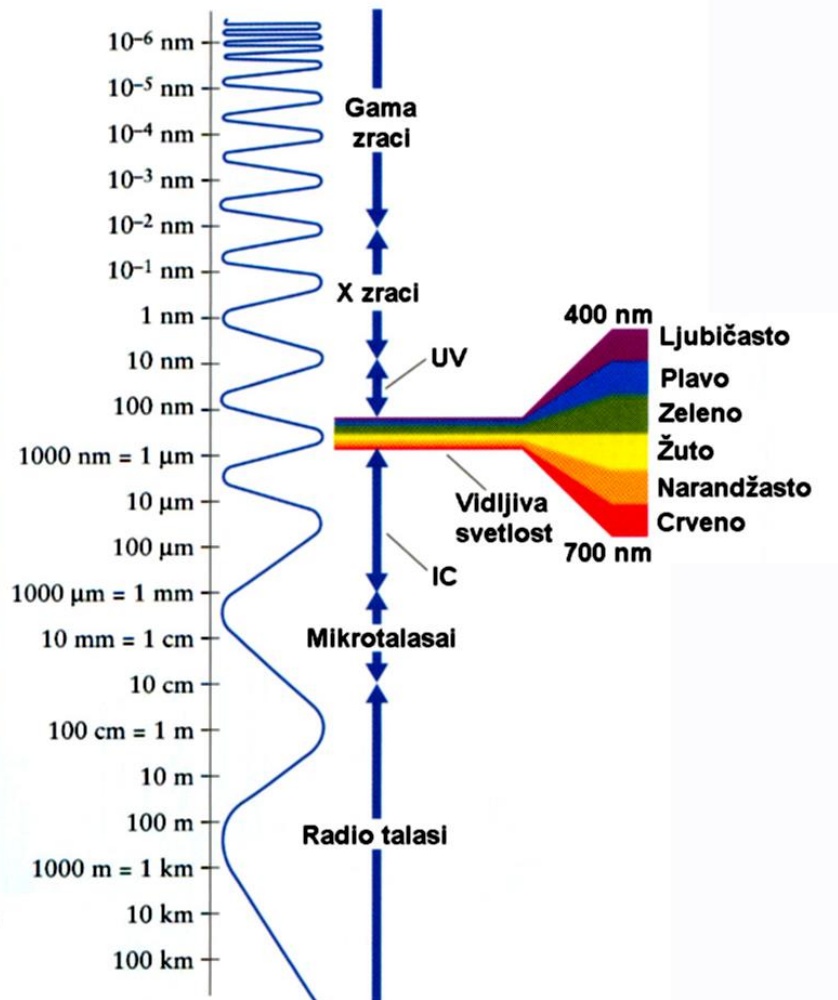


# Elektro-magnetni spektar



$$E = h\nu$$

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

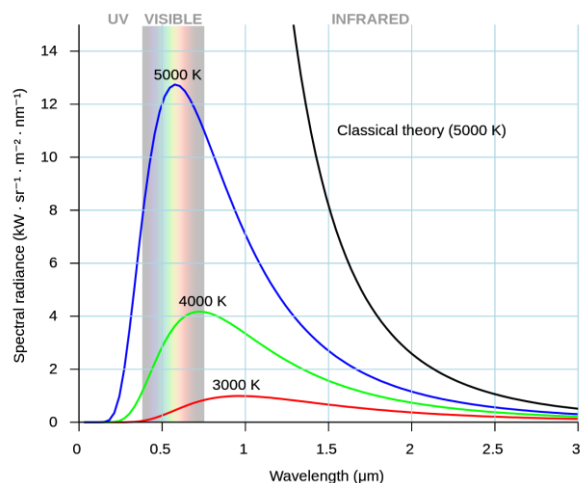




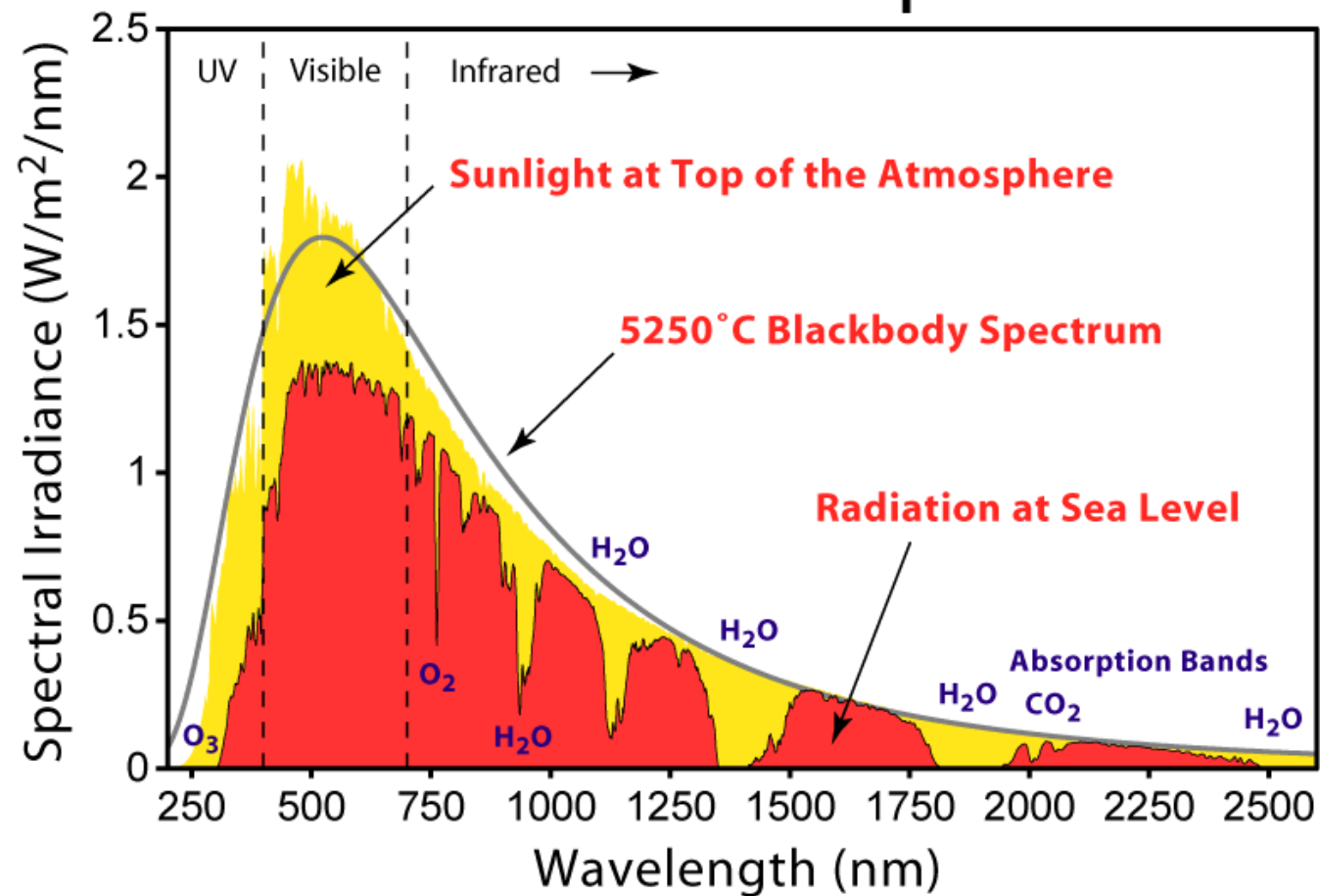
# Zračenje zvezda

- ▶ Sunce - intenzitet najveći u vidljivom delu spektra
- ▶ Raspodela energije zračenja zvezda – Vinov zakon pomeranja

$$\lambda_{max} = T \cdot b, b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$



## Solar Radiation Spectrum



# Zračenje zvezda

- ▶ Oblast  $\lambda_{max}$  određuje boju zvezde (posledica površinske temperature)
  - ▶ Temperatura od 4300 do 7700 K – maksimum u vidljivom delu spektra
  - ▶ Sunce oko 5800 K, maksimum u žutom delu (G2)
  - ▶ Temperatura < 4300 K – maksimum u IR oblasti
  - ▶ Temperatura > 7700 K – maksimum u UV oblasti

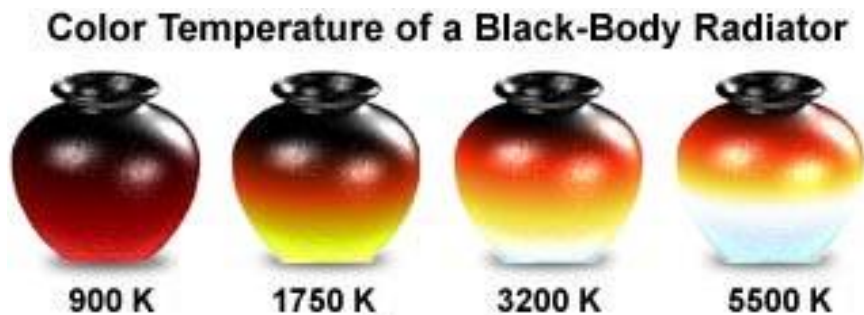
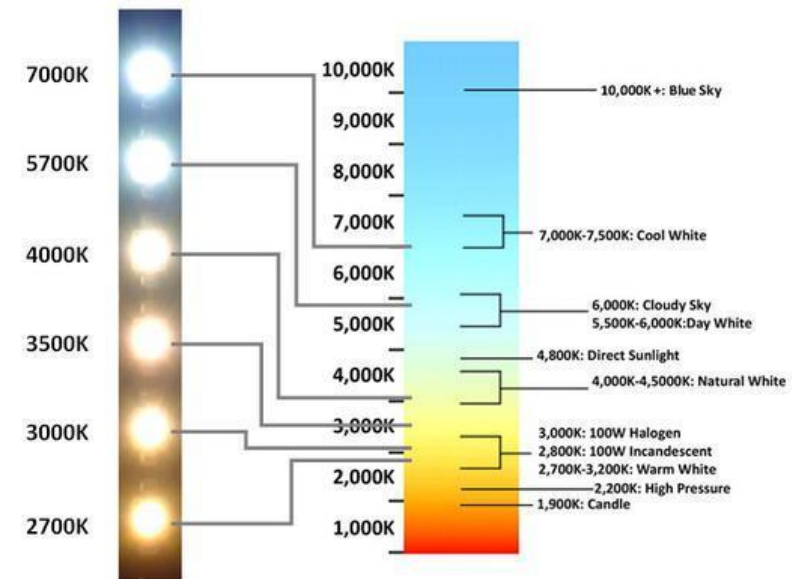


Figure 1

Basic LED Reference Example

Kelvin Color Temperature Scale Chart



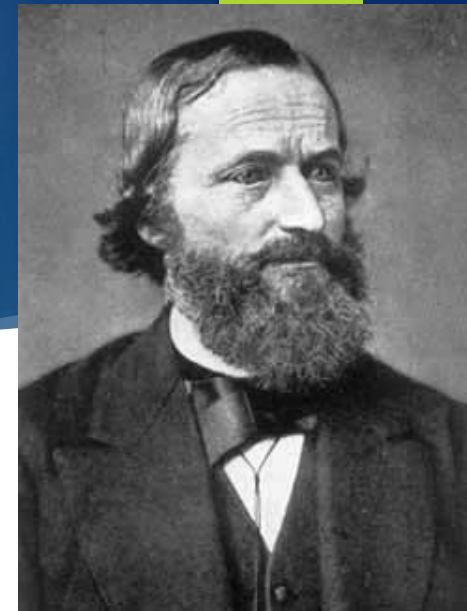
Internet, negde 2015. godine 😊



Temperatura boje?

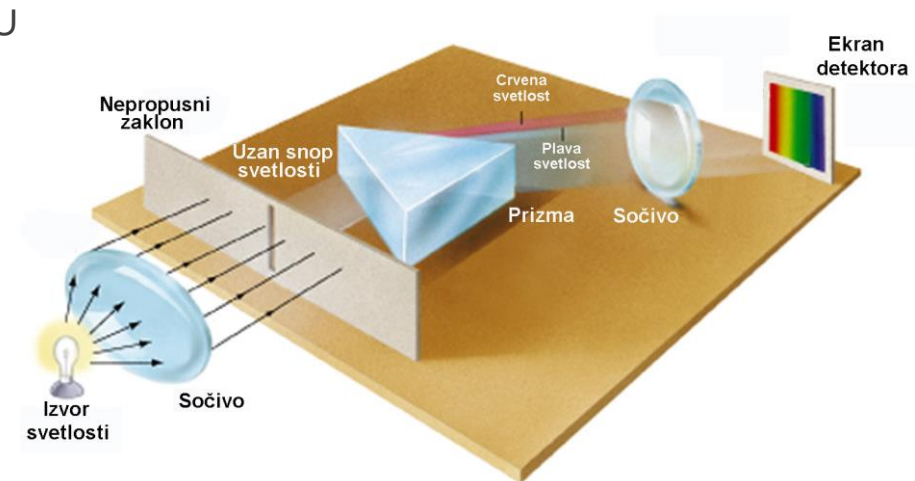
# Spektralna analiza

- ▶ Kirhof i Bunzen (1859)
- ▶ **Princip identičnosti:** jedna supstanca emituje ili apsorbuje, zrači ili apsorbuje elektromagnetno zračenje uvek sa istim spektralnim linijama.
- ▶ Spektri nebeskih tela:
  1. Kontinuirani (neprekidni)
  2. Linijski
    1. Apsorpcioni
    2. Emisioni



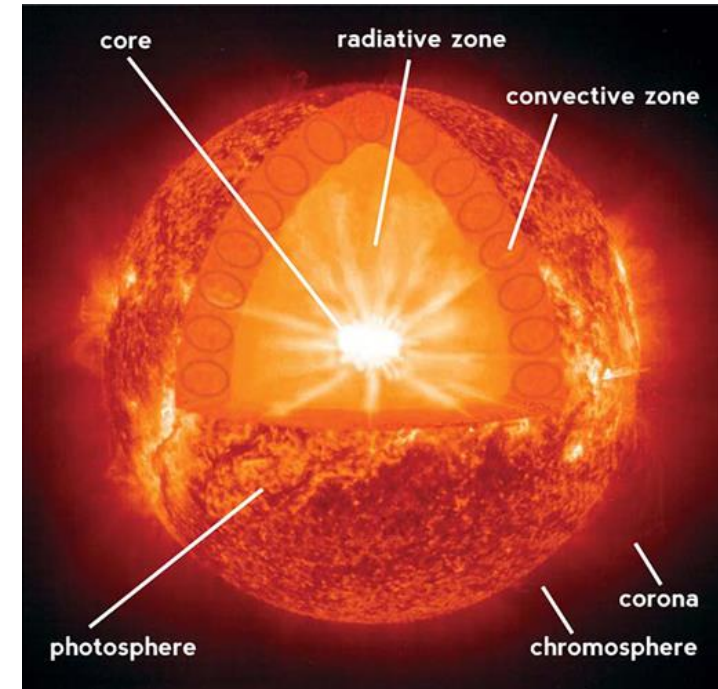
# Neprekidan spekter

- ▶ Sastoji se od zračenja svih talasnih dužina.
- ▶ Emituju ga usijana čvrsta tela ili usijani gasovi velike gustine i zapremine (zvezde).
- ▶ Njutn je utvrdio da se ova “bela” svetlost može pomoću optičke prizme razložiti na niz boja.
- ▶ Razlaganje (disperzija) bele svetlosti je posledica činjenice da se zračenja različitih talasnih dužina u istoj sredini prelamaju pod različitim uglovima.



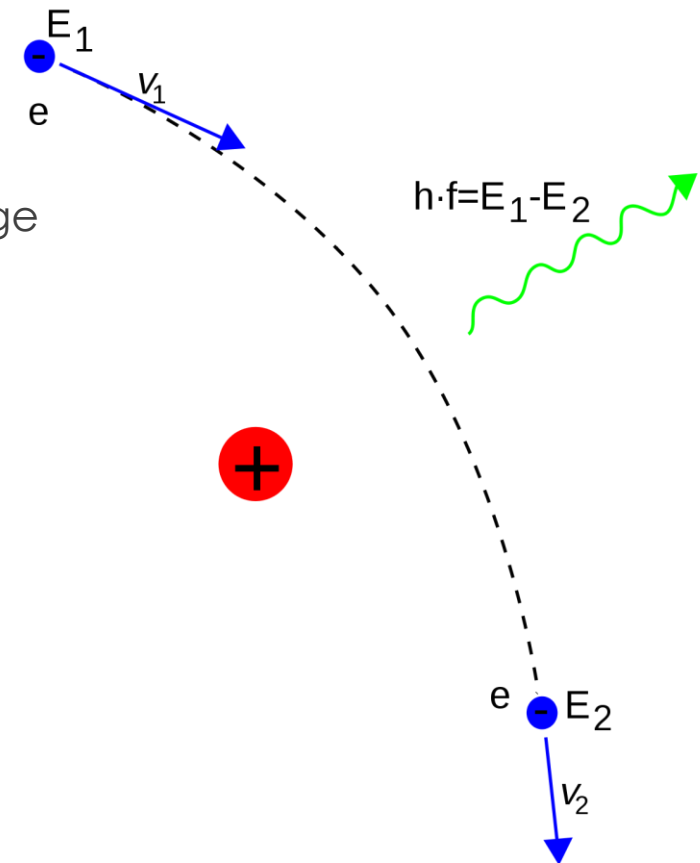
# Neprekidan spektar zvezda

- ▶ Uglavnom je nastao kao posledica termalnih kretanja (toplotno zračenje) čestica usijanog zvezdanog gasa (plazme).
- ▶ Na ovo zračenje mogu se primeniti zakoni zračenja apsolutno crnog tela, premda se zvezde samo uslovno mogu tretirati kao tela u termodinamičkoj ravnoteži.
- ▶ Maksimalan intenzitet neprekidnog spektra toplotnog zračenja zavisi od temperature "površine" (fotosfere) zvezde sa koje se zračenje emituje.
- ▶ Zračenje sa maksimalnim intenzitetom određuje boju zvezde.



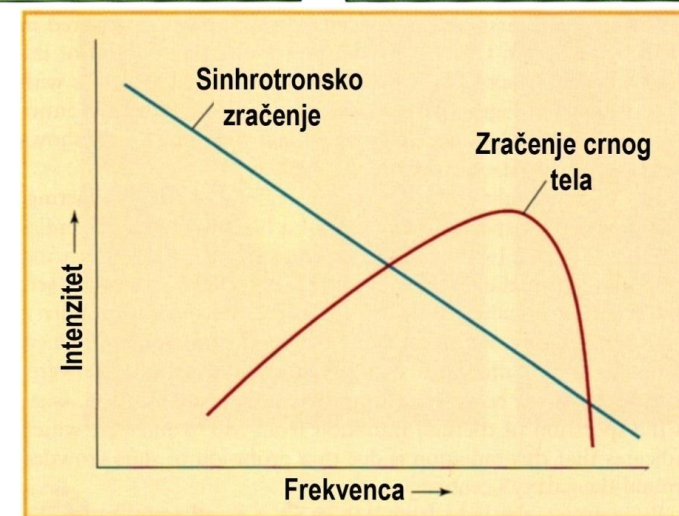
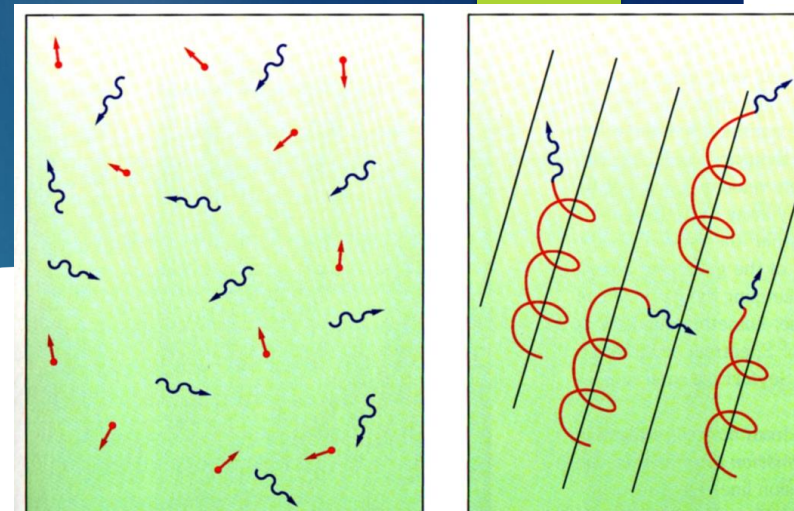
# Neprekidan spektar zvezda

- ▶ Neprekidni spektar zvezda nastaje i kao rezultat **zakočnog zračenja** (*bremstrahlung*).
  - ▶ Nastaje prilikom ubrzanog kretanja naelektrisane čestice u polju druge naelektrisane čestice (istoimenog ili raznoimenog naelektrisanja).
- ▶ Prema Maksvelovoj teoriji, pri ubrzanom kretanju naelektrisane čestice emituju elektromagnetno zračenje.
- ▶ Tom prilikom gubitak kinetičke energije čestice jednak je energiji emitovanog fotona.



# Neprekidan spektar zvezda

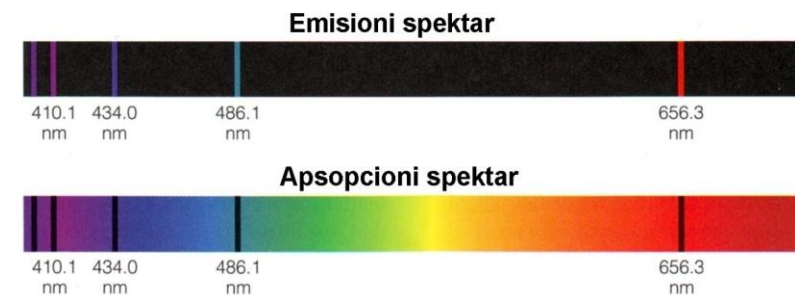
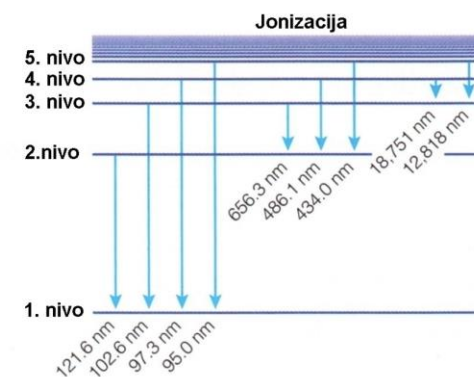
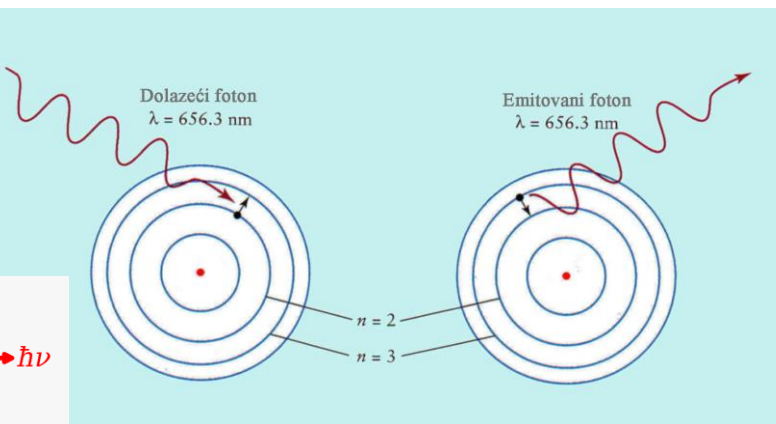
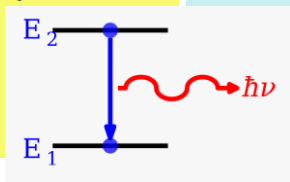
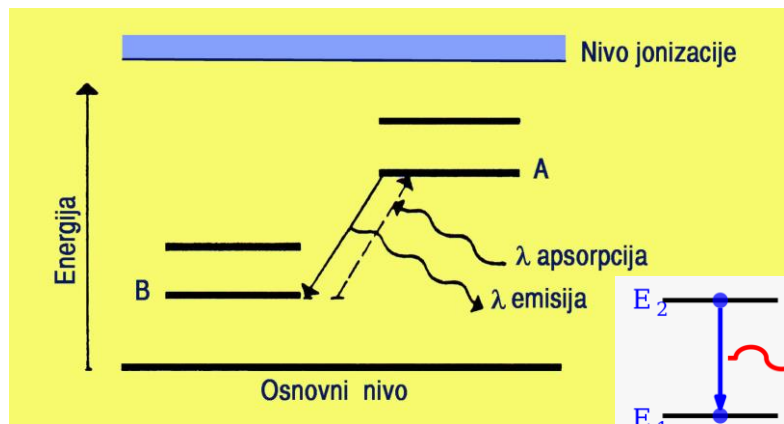
- ▶ Može nastati i mehanizmom **ciklotronske rotacije**.
- ▶ Naelektrisane čestice se, zbog delovanja Lorencove sile, u magnetnom polju kreću po kružnim ili spiralnim putanjama normalno na linije magnetnog polja.
- ▶ Prilikom ovog ubrzanog kretanja čestice **emituju sinhrotronsko zračenje**.
- ▶ Intenzitet **zavis**i od **energije čestice** i od **jačine magnetnog polja**.
- ▶ Pošto su kod kosmičkih objekata plazmene čestice različitih energija to je i spektar ovog zračenja kontinuiran.
- ▶ Analizom mogu se dobiti informacije o karakteru i jačini magnetnog polja zvezda, planeta ili interstelarnih oblaka gasa i prašine.





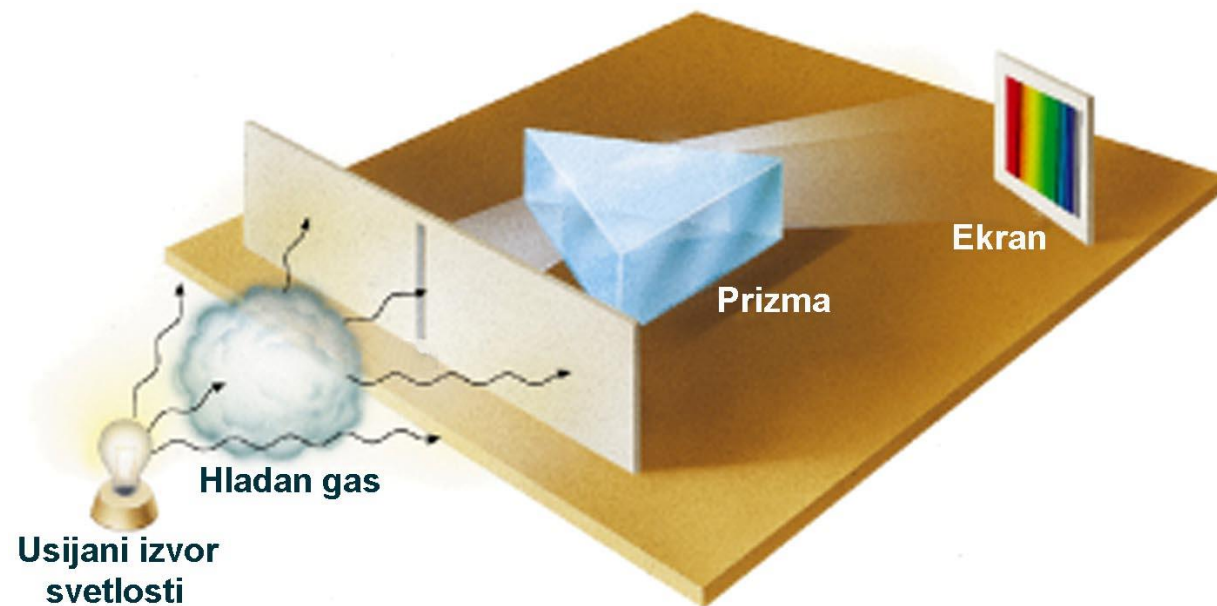
# Linijski spektar

- ▶ Nastaje kod **razređenih gasova** sastavljenih od atoma čiji **elektroni emituju ili apsorbuju fotone** sa uzanim intervalom talasnih dužina (prirodna širina linije).
  - ▶ **Apsorpcioni** linijski spektar
  - ▶ **Emisioni** linijski spektar



# Apsorpcioni linijski spektar

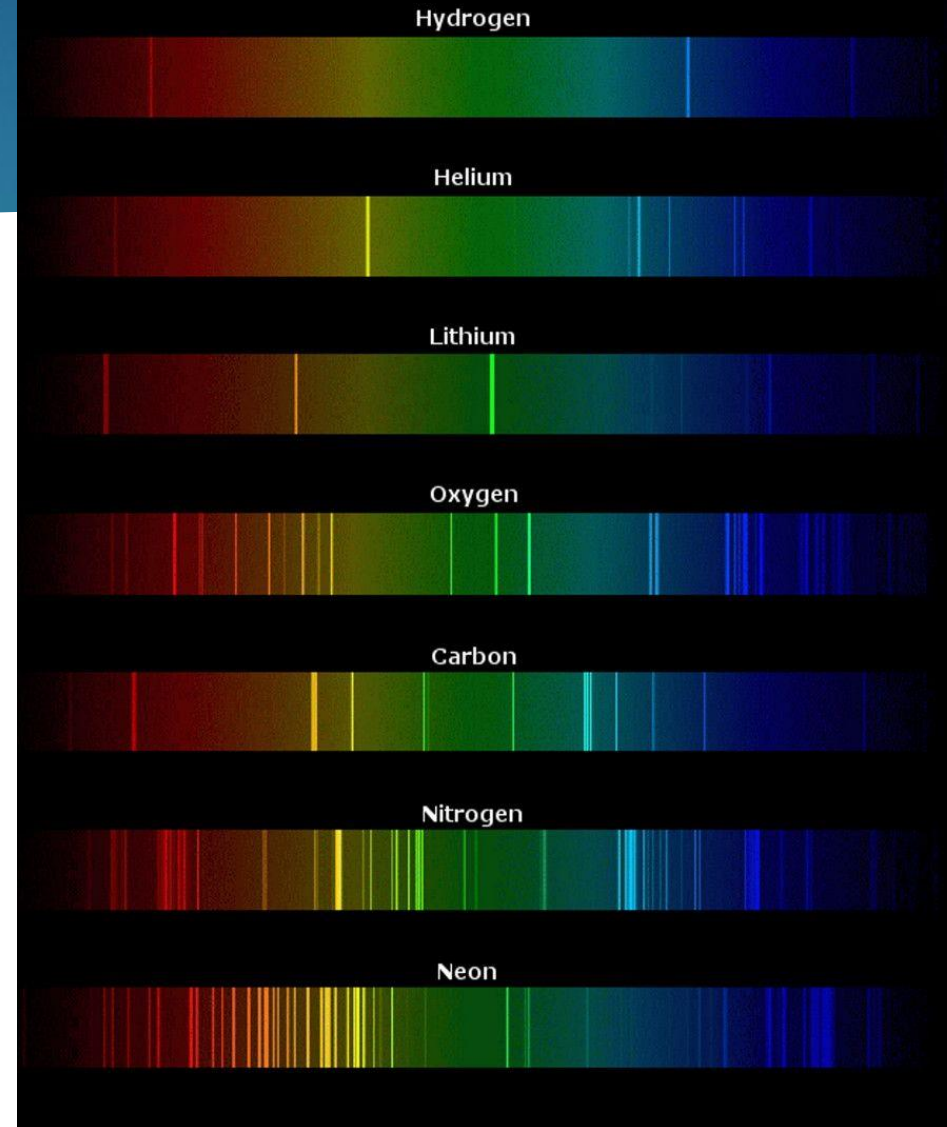
- ▶ Stvara se kod **razređenih hladnih gasova** sastavljenih od atoma.
- ▶ Nastaje kada elektron u atomu **apsorbuje foton** određene talasne dužine.
- ▶ Tom prilikom dolazi do **ekscitacije ili jonizacije** atoma, a na kontinuiranom fonu spektra **nedostaje zračenje** koje odgovara talasnoj dužini apsorbovanog fotona (tamne, apsorpcione linije).



# Apsorpcioni linijski spektar

- ▶ “Matični broj” (ili „*otisak prsta*“) svakog atoma.
- ▶ Intenziteti, položaji i međusobna rastojanja linija specifične su karakteristike svakog atoma.
- ▶ Jedan atom **emituje ili apsorbuje** fotone **iste talasne dužine**.
- ▶ Spektri atoma određenog elementa koji su nastali u svemiru podudaraju se sa laboratorijski dobijenim spektrima tih istih atoma.
- ▶ **Spektroskopska analiza** je **beskontakna** metoda koja omogućuje identifikaciju hemijskog sastava kosmičke supstance.

## Samples of Emission Spectra



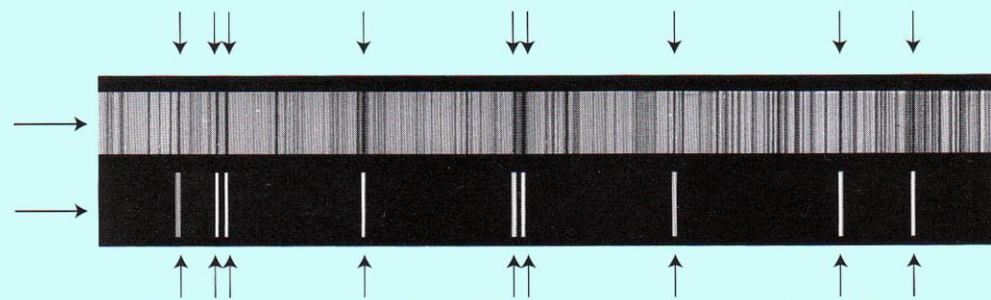
# Spektar Sunca



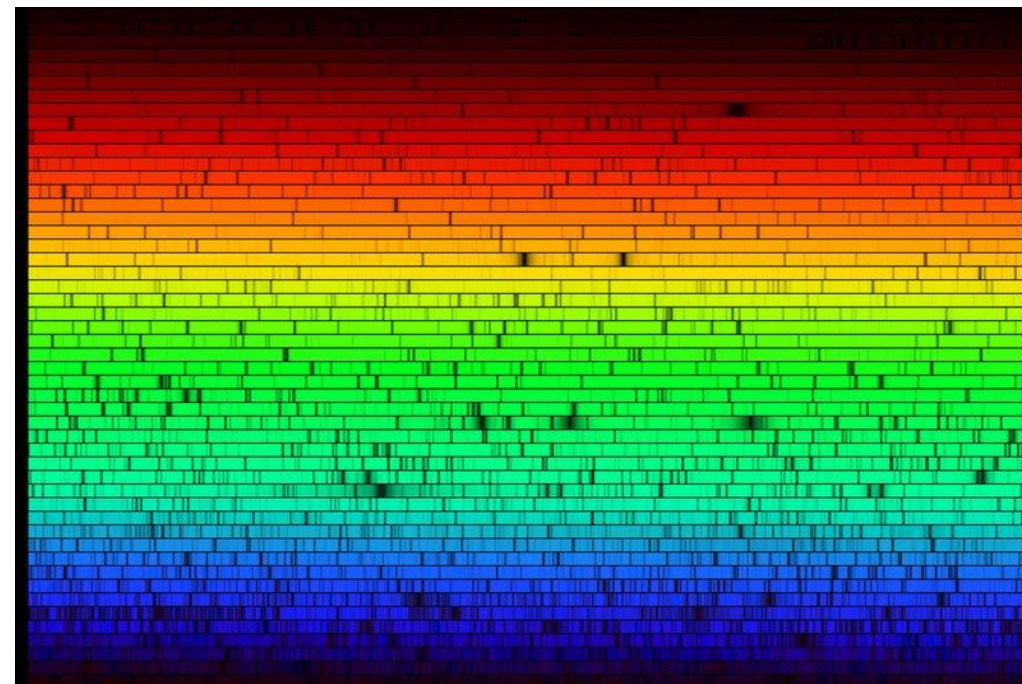
- ▶ J.G. Fraunhofer (1814) nakon usavršavanja spektroskopa u spektru Sunca snimio 576 tamnih linija (Fraunhoferove linije).
- ▶ Do danas otkriveno 30 000 linija, koje odgovaraju laboratorijski dobijenim spektrima 72 elementa.

Apsorpcioni spektar Sunca

Emisioni spektar gvožđa  
(snimljen u laboratoriji na Zemlji)

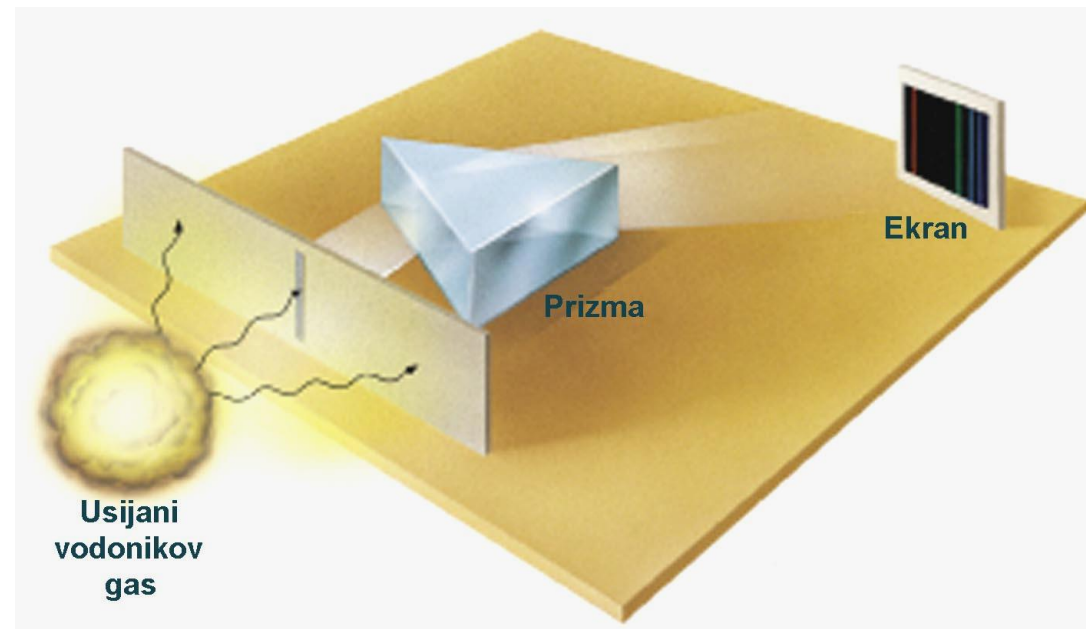


Svakoj emisionoj liniji gvožđa odgovara apsorpciona linija u spektru Sunca. To pokazuje postojanje gvožđa u atmosferi Sunca.



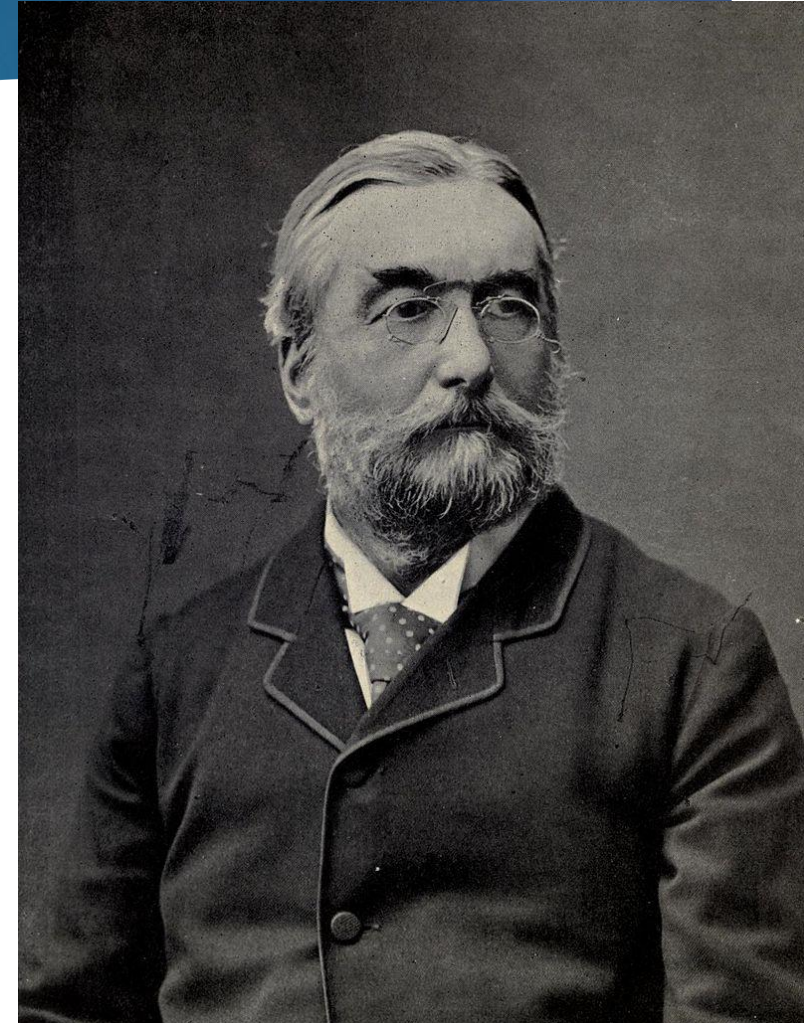
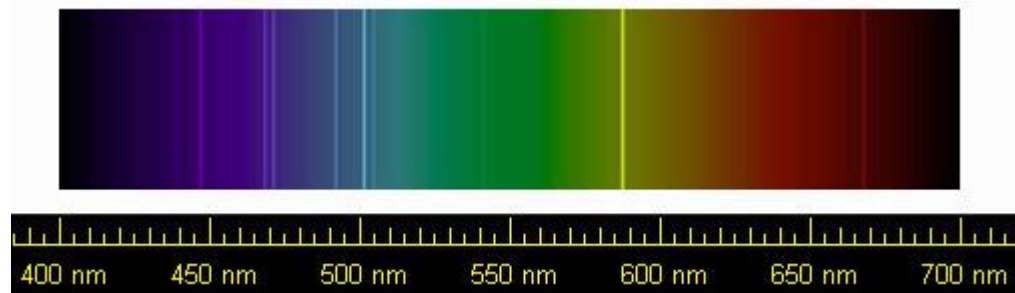
# Emisioni linijski spektar

- ▶ Nastaje kada prilikom deekscitacije kod usijanih gasova pobuđeni elektron emituje foton.
- ▶ Tom prilikom nastaju emisione, sjajne linije, koje odgovaraju atomima određene supstance.
- ▶ Linije superponiraju na kontinuirani fon već prisutnog zračenja.



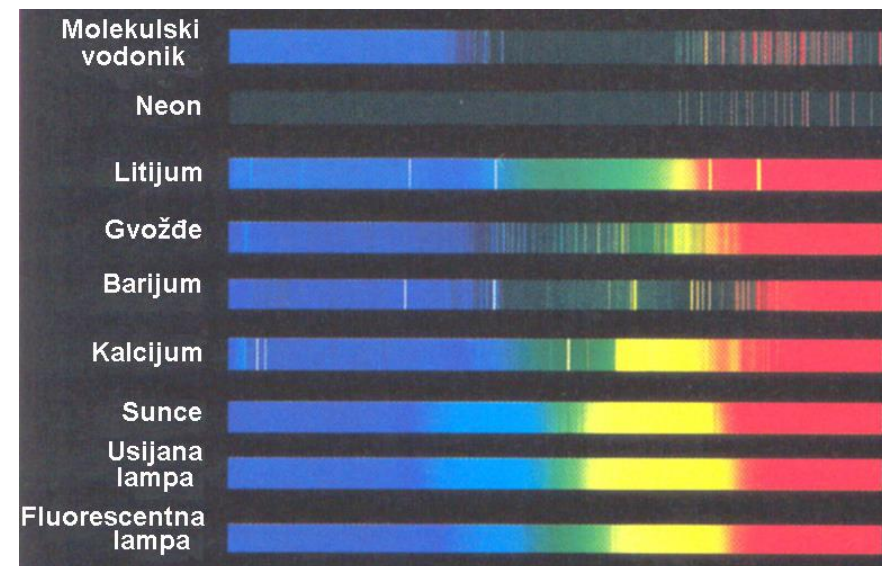
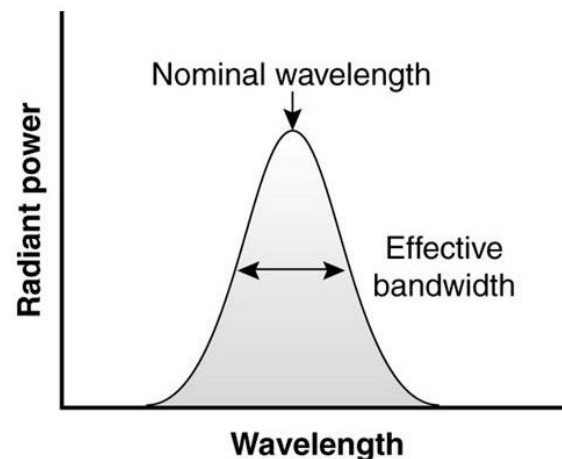
# Identifikacija hemijskog sastava

- ▶ Vrši se upoređivanjem njihovih linijskih spektara sa laboratorijski dobijenim spektrima poznatih elemenata.
- ▶ Džozef Nojman Lokjer (1868) u spektru Sunca otkrio linije, do tada, nepoznatog elementa koji je nazvan **helijum**.
  - ▶ Ovaj element je tek 1895. g. nađen i na Zemlji (Ramsej).



# Identifikacija hemijskog sastava

- ▶ Spektralne linije **nastaju u prelazu između diskretnih energetske nivoa** atoma ili molekula.
- ▶ Molekuli emituju **trakasti spektar**, koji se sastoji od gusto složenih spektralnih linija.
- ▶ Osim rasporeda (čime se određuje hemijski sastav) važne osobine linija su:
  - ▶ **intenzitet**,
  - ▶ **profil** (raspodela jačine zračenja unutar talasnog područja linije).

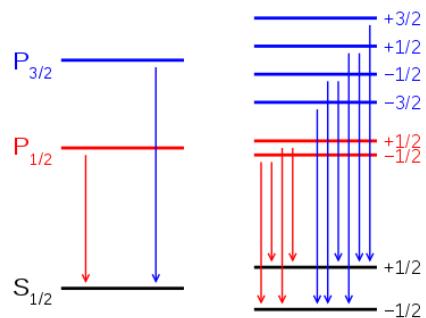
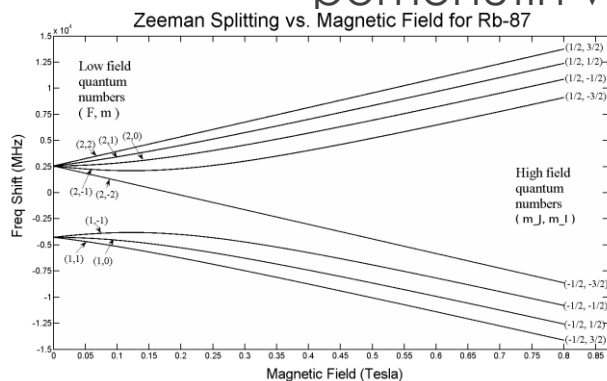


# Intenzitet i profil linije

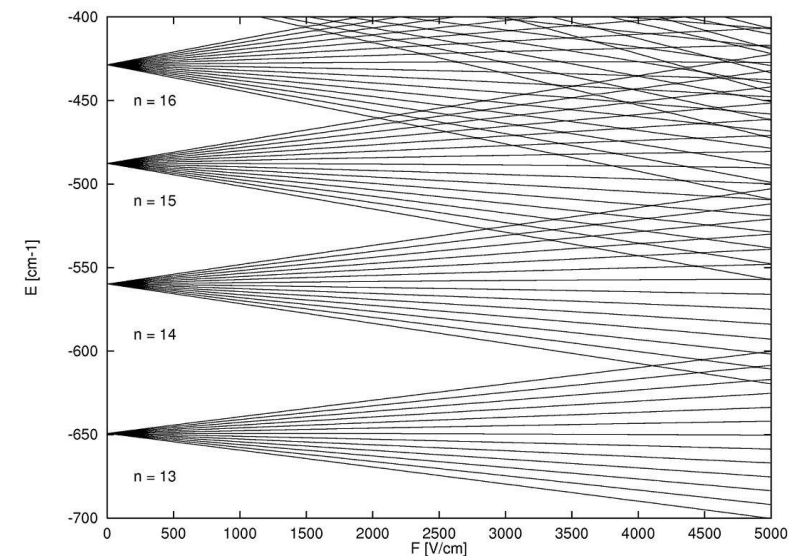


www.eso.org

- ▶ Zavise od različitih faktora:
  - ▶ temperature i koncentracije čestica (Doplerovo širenje),
  - ▶ jačine prisutnog magnetnog (**Zemanov efekt** cepanja) i električnog polja (**Štarkovo širenje**, 1919 – Nobelova nagrada),
  - ▶ makroskopskih kretanja u objektu, itd.
- ▶ Analiza ovih karakteristika linija omogućuje merenje pomenutih veličina.



Zemanov efekt

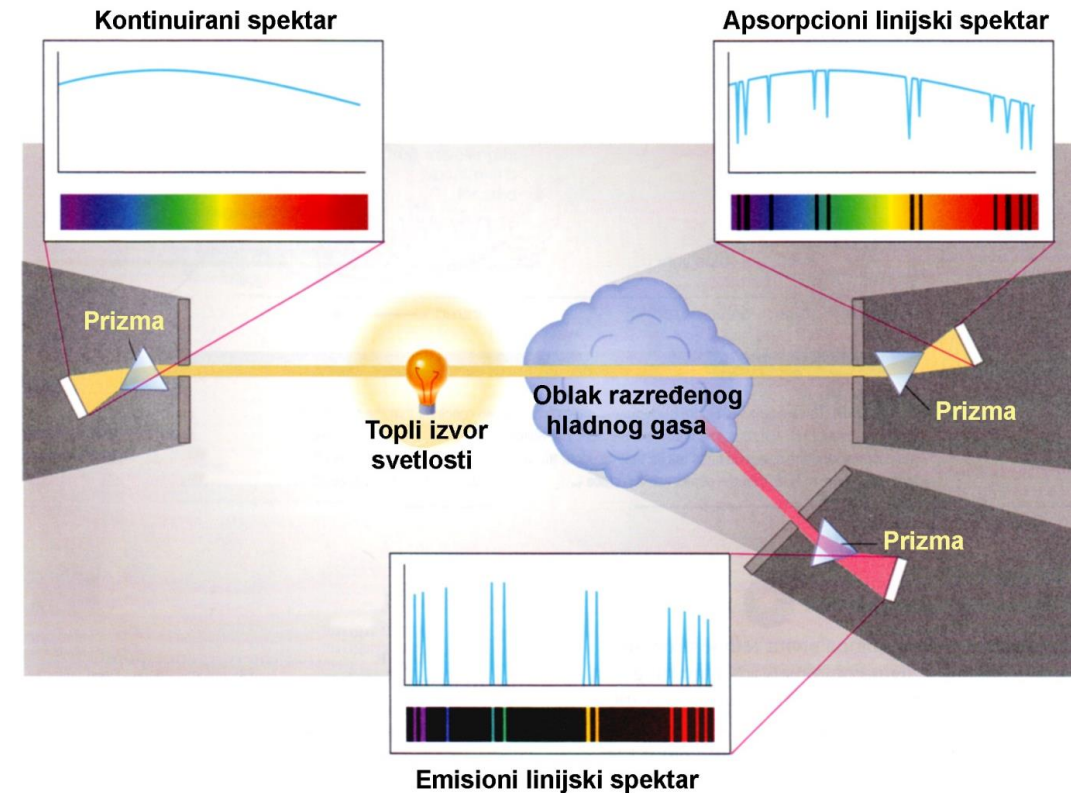


Štarkov efekt



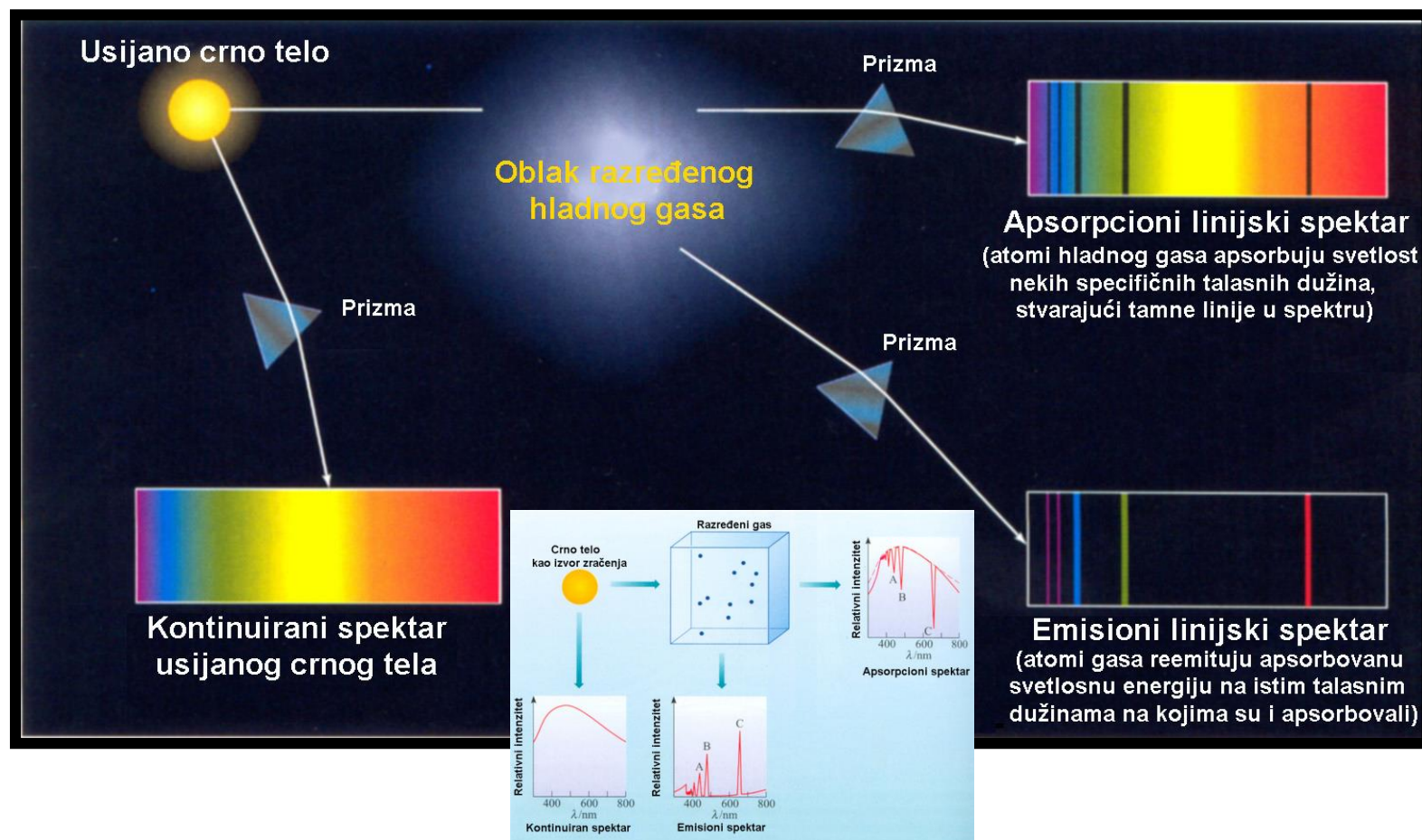
# Apsorpcioni spektar

- ▶ Na putu od toplog izvora svetlosti do posmatrača, kontinuirano zračenje može proći **kroz oblak** razređenog hladnog gasa.
- ▶ U tom slučaju će se pomoću spektroskopa postavljenog u pravcu izvora na zaklonu detektovati tamne linije na fonu neprekidnog spektra.
- ▶ One su nastale zbog apsorpcije određenih fotona od strane prisutnih atoma.



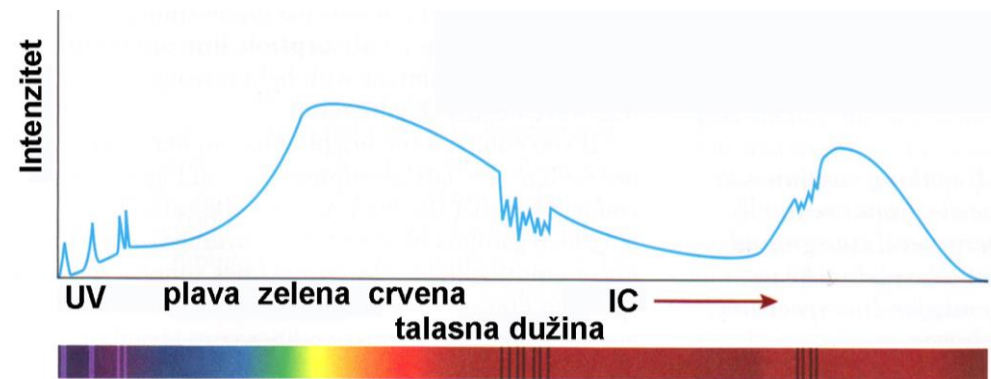
# Apsorpcioni i emisijski spektar

- ▶ U isto vreme, kada se analizira **spektar zračenja oblaka**, ali za svetlost čiji se **pravac** prostiranja **ne poklapa** sa pravcem zračenja koje dolazi od usijanog izvora, na zaklonu se detektuju **emisione linije**.
- ▶ **Emisione linije** iz oblaka gasa nastaju kada se pobuđeni atomi gasa “**vraćaju**” u osnovno stanje, **reemitujući apsorbovanu svetlost** na istim talasnim dužinama na kojima su i apsorbovali



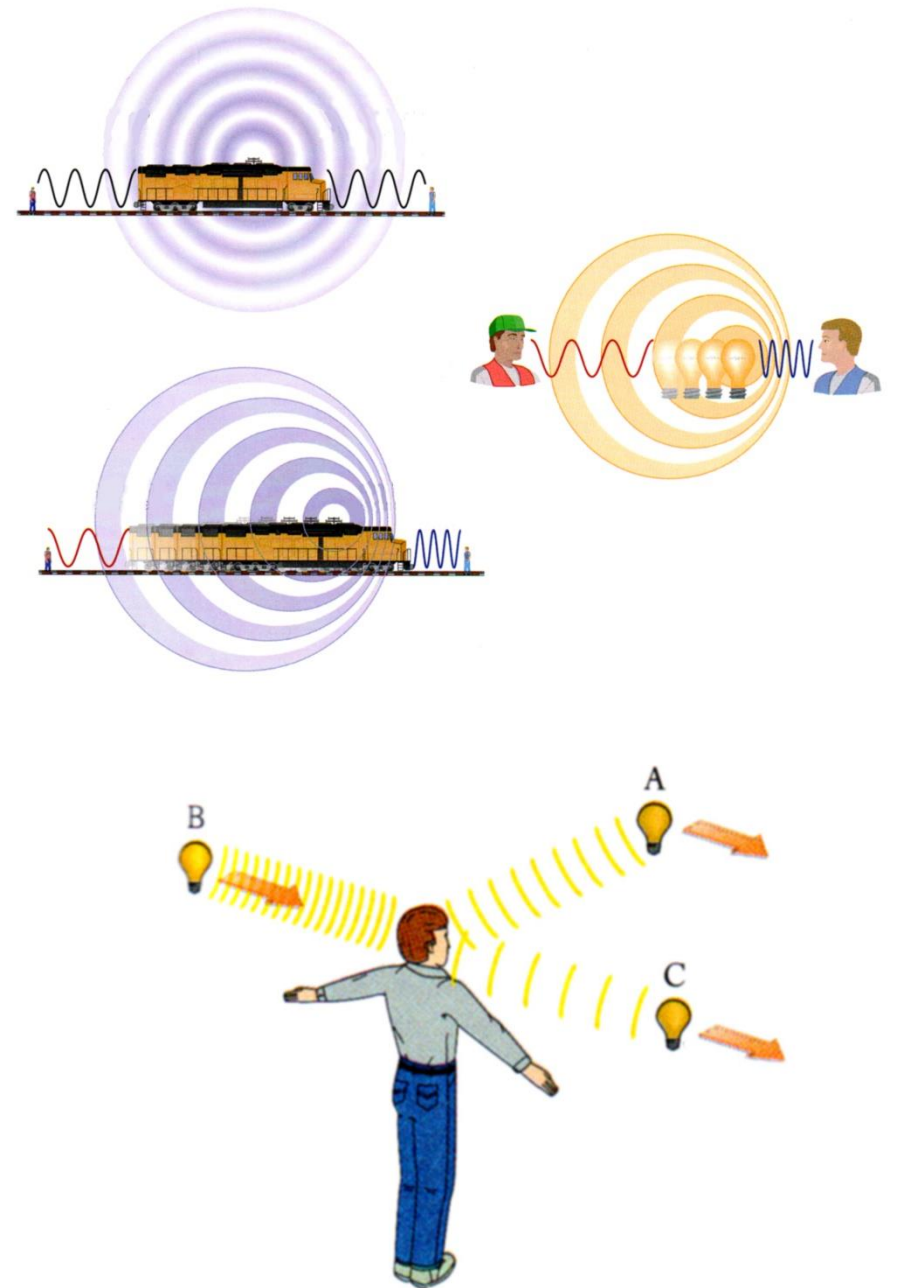
# Apsorpcioni i emisijski spektar zvezda

- ▶ Kontinuiran spektar emituje se sa fotosfere („površine“ zvezde).
- ▶ **Apsorpcioni spektar** nastaje u **hladnijim slojevima** atmosfere zvezde ili u hladnim oblacima interstelarnog gasa ili u atmosferi planete.
- ▶ Međutim, **na kontinuiranom spektru** fotosfere mogu da se u određenim slučajevima uoče i **sjajne emisijske linije**.
- ▶ Takva situacija nastupa kada **kontinuirano zračenje prolazi kroz slojeve atmosfere koji su topliji od fotosfere** (kod Sunca je takav slučaj sa **koronom** koja je poslednji sloj u njegovoj atmosferi).



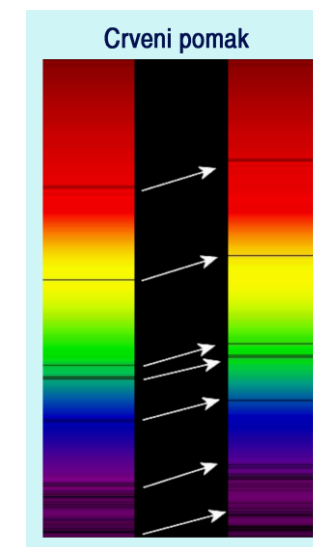
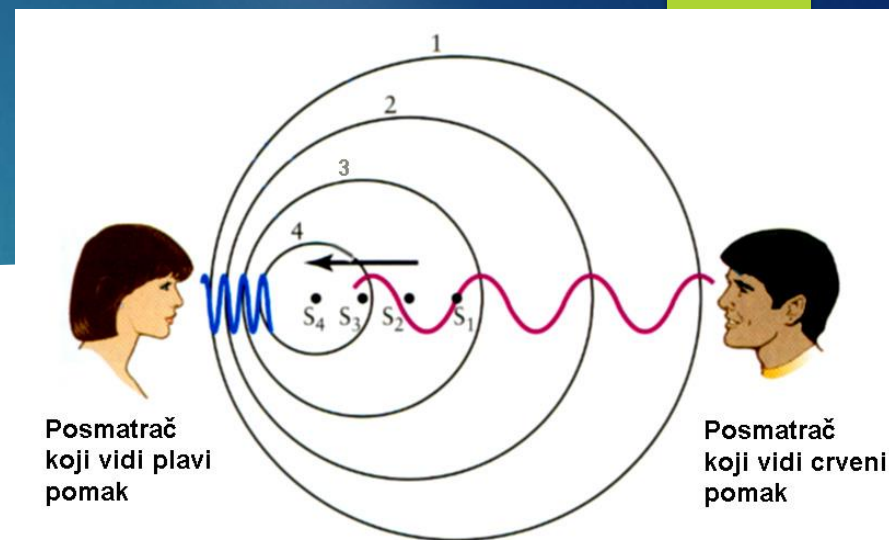
# Doplerov efekat i zračenje

- ▶ Nebeska tela - kreću udaljavajući se ili približavajući u odnosu na posmatrača.
- ▶ Doplerov efekat predstavlja promenu talasne dužine zvuka ili svetlosti kada se izvor talasa i posmatrač međusobno kreću.
- ▶ Sa **približavanjem** posmatrač detektuje **povećanje** frekvence, a sa **udaljavanjem** smanjenje.



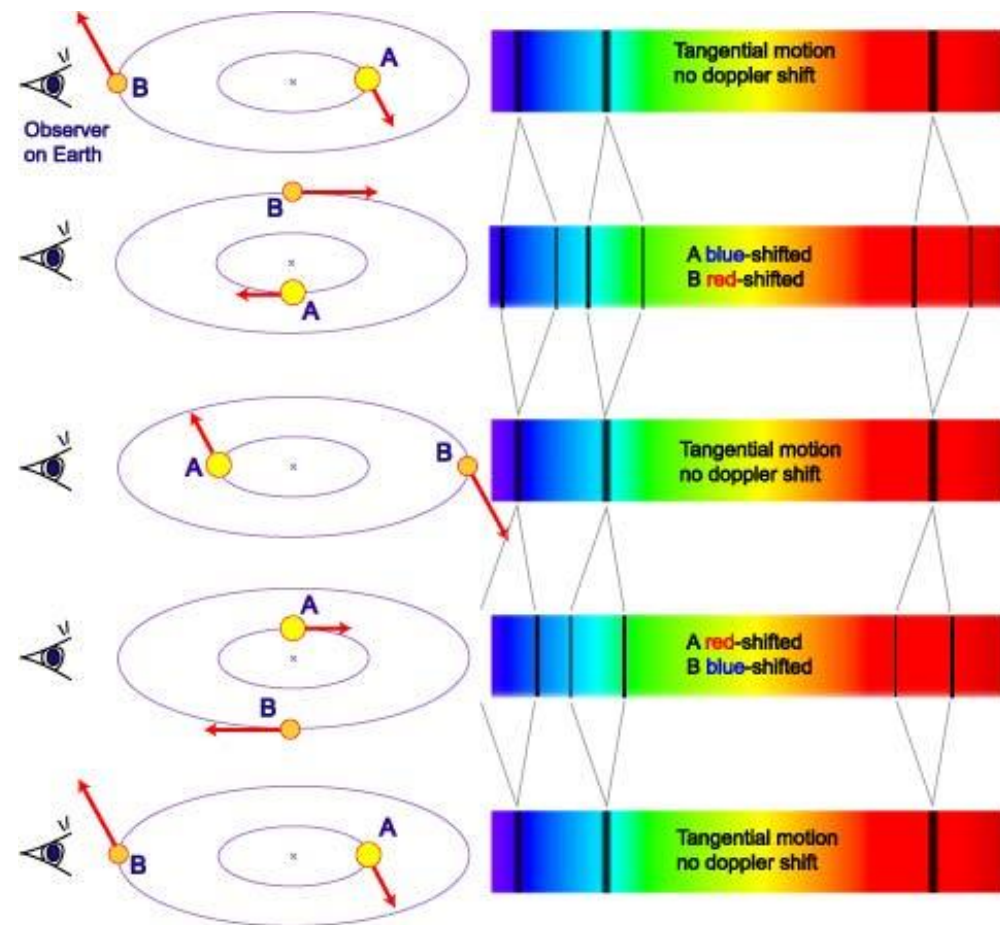
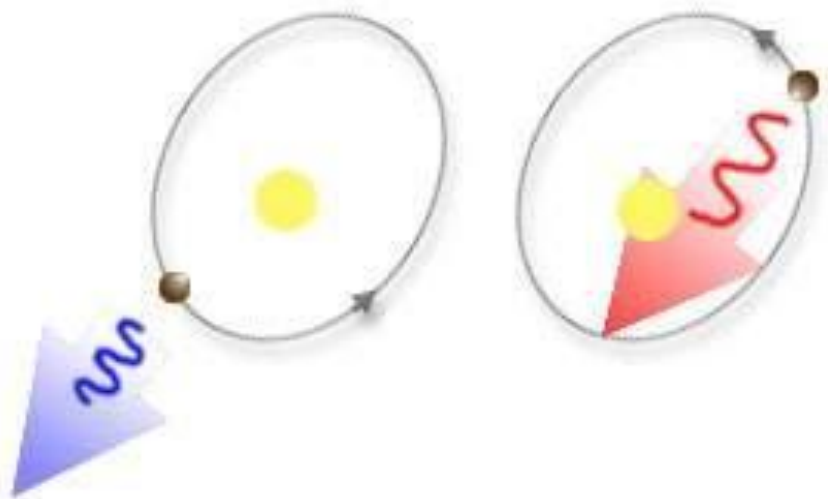
# Doplerov efekat

- ▶ Svetlost: **crveni** i **plavi** pomak
- ▶ Kod zvezde koje se od nas udaljava **ne dolazi do promene boje** zbog (Bajs-Balot, 1845)
  - ▶ crvene linije prelaze u infracrvene, ali na drugom kraju spektra linije iz UV dela prelaze u ljubičasti i plavi deo, tako da nema promene boje zvezde.



# Doplerov efekat

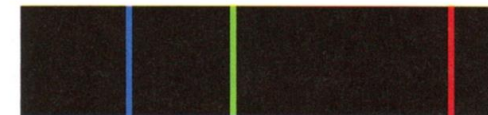
- ▶ Kod dvojnih zvezda dolazi do naizmjeničnog plavog i crvenog pomaka.
- ▶ Na osnovu veličine pomaka mogu se odrediti parametri kretanja takvog dvojnog sistema.



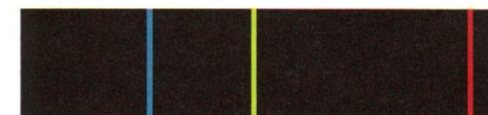
# Doplerov pomak

- ▶ Veličine pomaka zavise od relativnih brzina udaljavanja (približavanja) izvora i posmatrača:
  - ▶ većim brzinama odgovaraju veći pomaci.
- ▶ Pomoću Doplerovog pomeranja linija u odnosu na laboratorijski spektar može se odrediti radijalna brzina  $u_r$  kretanja izvora u odnosu na posmatrača.
- ▶ Za nerelativističke brzine  $\nu = \nu_0 \pm \frac{u_r}{c} \nu_0$ 
  - ▶ Gde je  $\nu_0$  frekvenca zračenja koje emituje izvor,  $\nu$  – frekvenca na detektoru,  $c$  – brzina svetlosti
- ▶ Relativna brzina  $u_r = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda}$

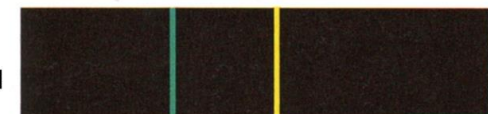
Laboratorijski spektar



Objekt 1  
Crveni pomak; objekt se udaljava od posmatrača



Objekt 2  
Veliki crveni pomak; objekt se udaljava brže od objekta 1



Objekt 3  
Plavi pomak; objekt se približava posmatraču



Objekt 4  
Veliki plavi pomak; objekt se približava brže od objekta 3



# Relativistički Doplerov efekat

- ▶ U slučaju relativističkih brzina, tj. kad je  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda}{\lambda} > 0,3$  primenjuje se izraz za **relativistički Doplerov efekat**

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{u_r}{c}}{1 - \frac{u_r}{c}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_r^2}{c^2}}}$$

- ▶ Udaljene galaksije – **kosmološki crveni pomak** (zbog širenja svemira)
- ▶ Gravitacioni crveni pomak



# Gravitacioni crveni pomak

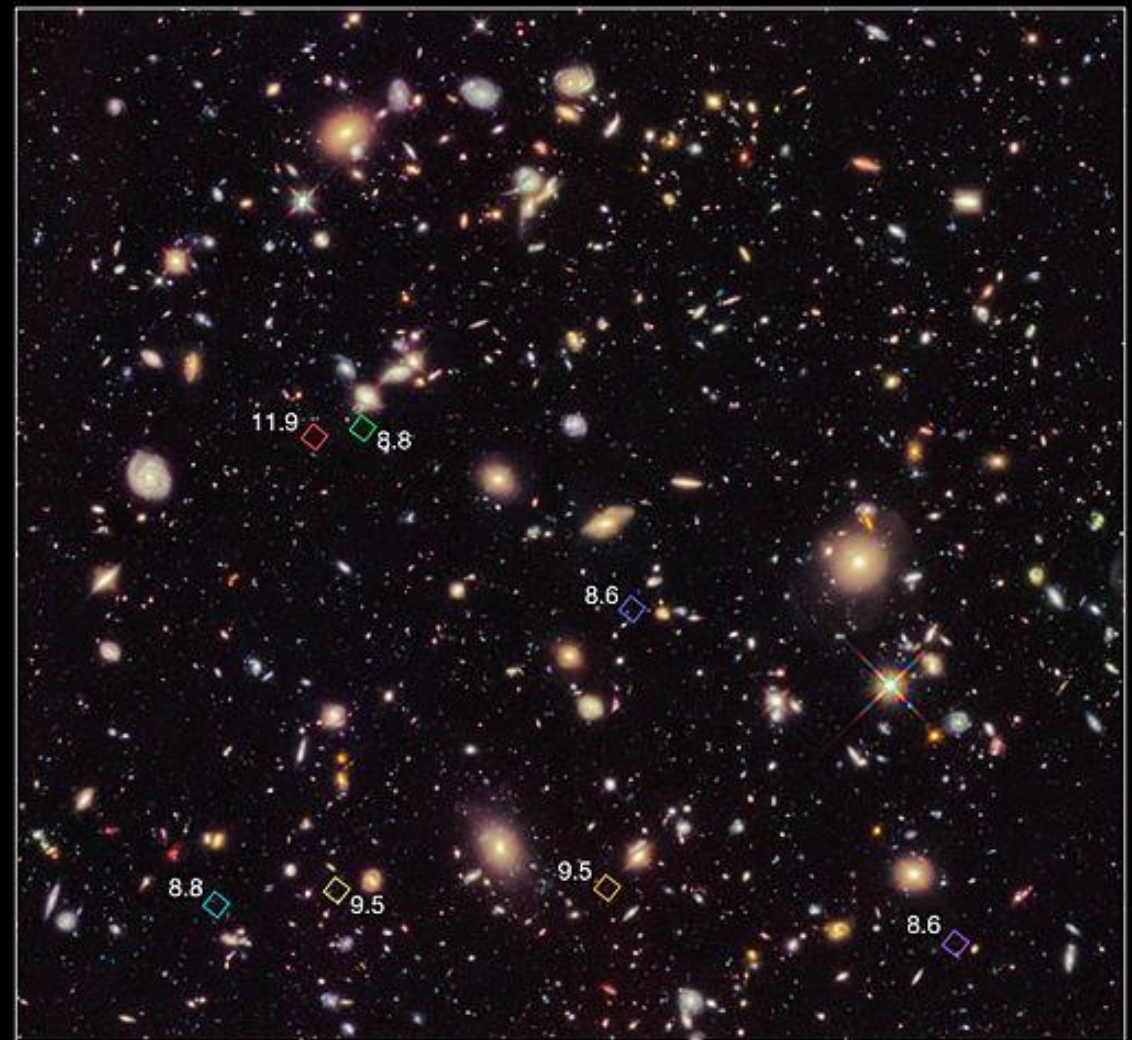
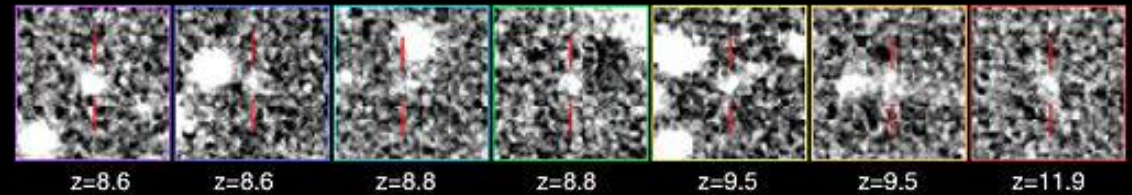
- ▶ Kad svetlost napušta masivne objekte – fotoni gube energiju (smanjuje se frekvenca) jer savladavaju jak gravitacioni uticaj izvora
- ▶ Promena frekvence

$$\Delta\nu = \nu \frac{GM}{Rc^2} \quad \text{Njutnova gravitacija}$$
$$\Delta\nu = \nu \left( 1 - \frac{2GM}{Rc^2} \right)^{-1/2} - 1 \quad \text{prema OTR}$$

- ▶ Gde je  $M$  masa zvezde, a  $R$  njen poluprečnik

# Galaksije – najveći crveni pomak

$z$	$u_r$ [% $c$ ]
0.33	0.6593
0.5	0.7454
1	0.8660
2	0.9428
3	0.9682
4	0.9798
5	0.9860
6	0.9897
7	0.9922
8	0.9938
9	0.9950
10	0.9959
11	0.9965
12	0.9970



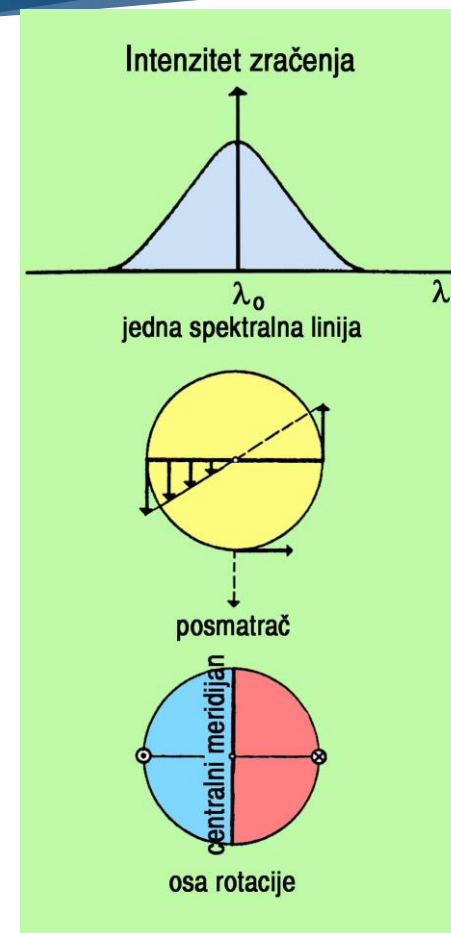
# Efekat rotacije

- ▶ Ako izvor zračenja rotira oko svoje ose i ako je brzina rotacije na ekvatoru  $u_r$ , onda oni delovi koji se **udaljavaju** od nas daju liniju koja je pomerenjena ka **crvenom**, a oni delovi koji nam se **približavaju** ka **plavom**

- ▶ Sve spektralne linije su **proširene**

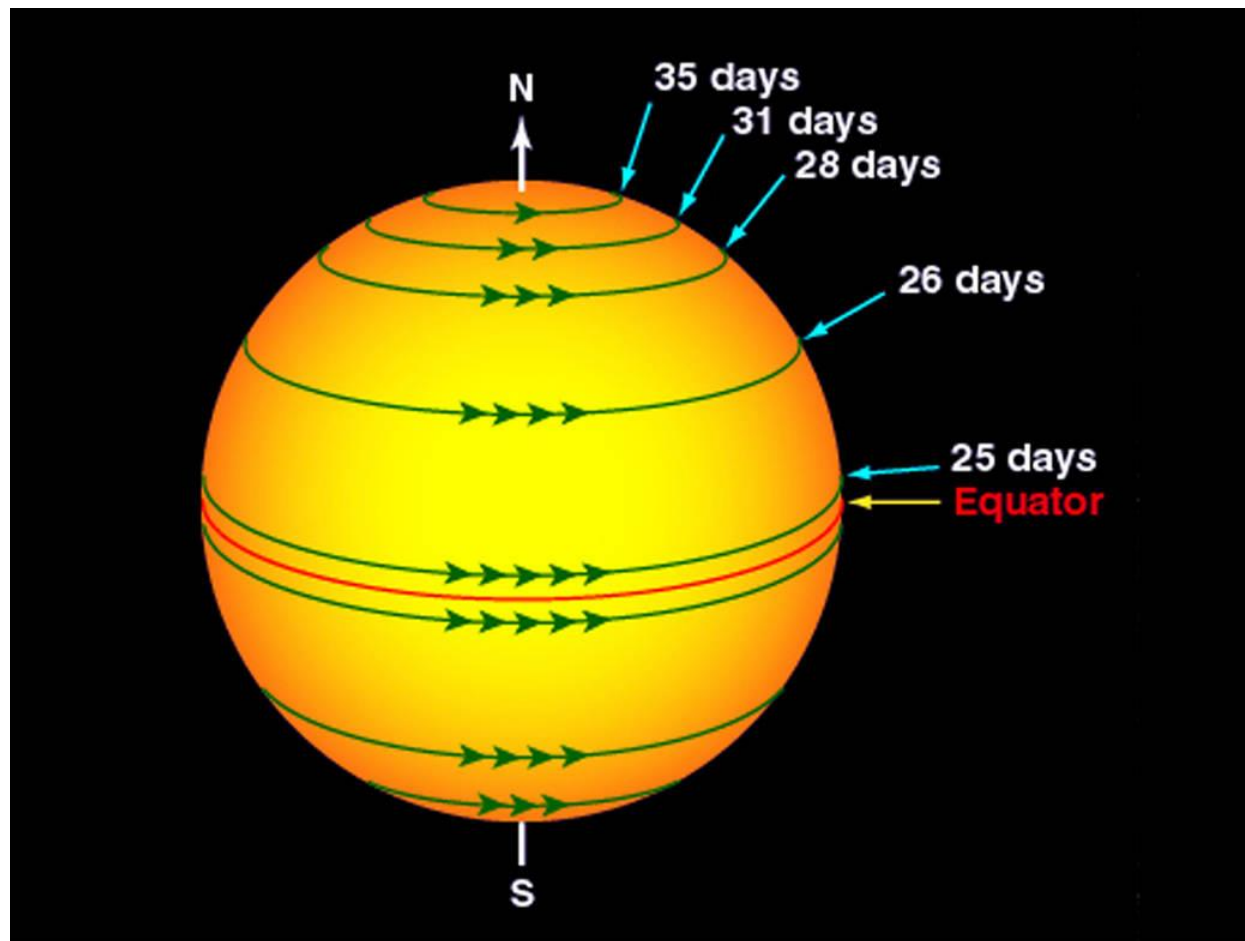
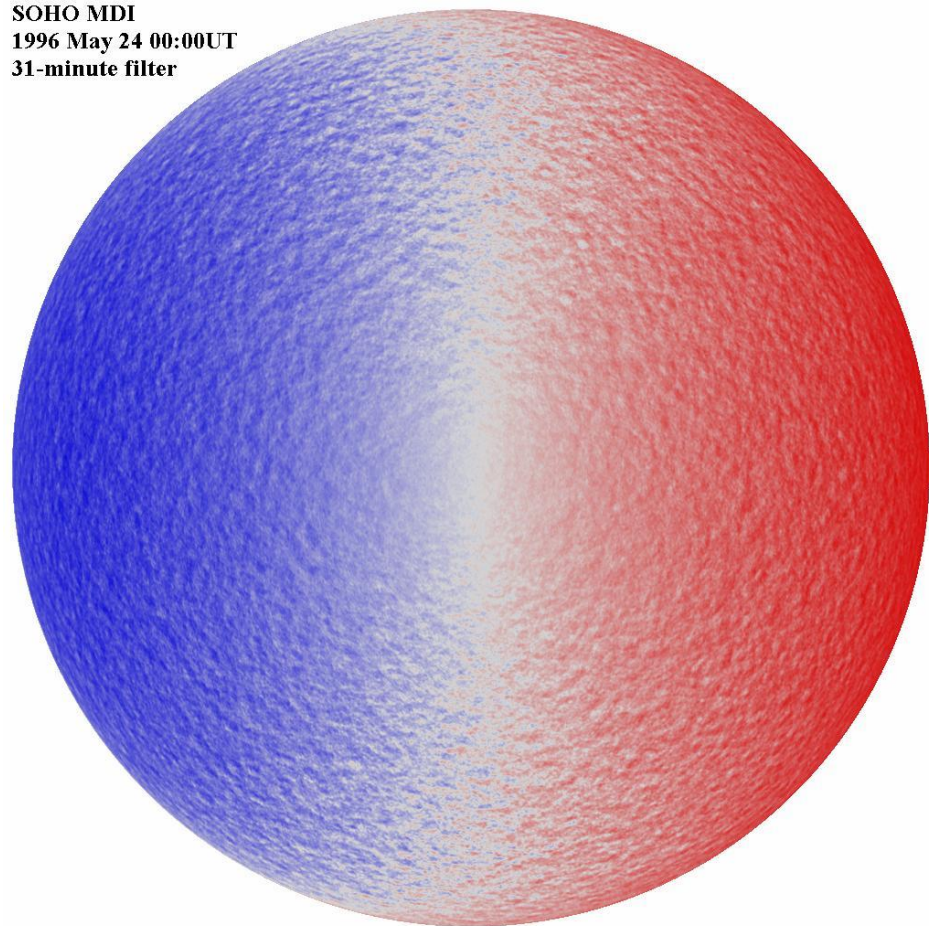
$$\Delta v_{rot} = v - v_0 = u_r \frac{v_0}{c} \sin i$$

- ▶ Određivanje  $u_r$  i  $\sin i$  - primena statistike, pod pretpostavkom da su ose rotacije zvezda ravnomerno raspoređene
- ▶ Najbrže – klasa O i B (400 – 200 km/s), od klase A do klase F – brzina opada od 200 do 100 km/s, manje od 75 km/s se ne uočava



# Rotacija Sunca

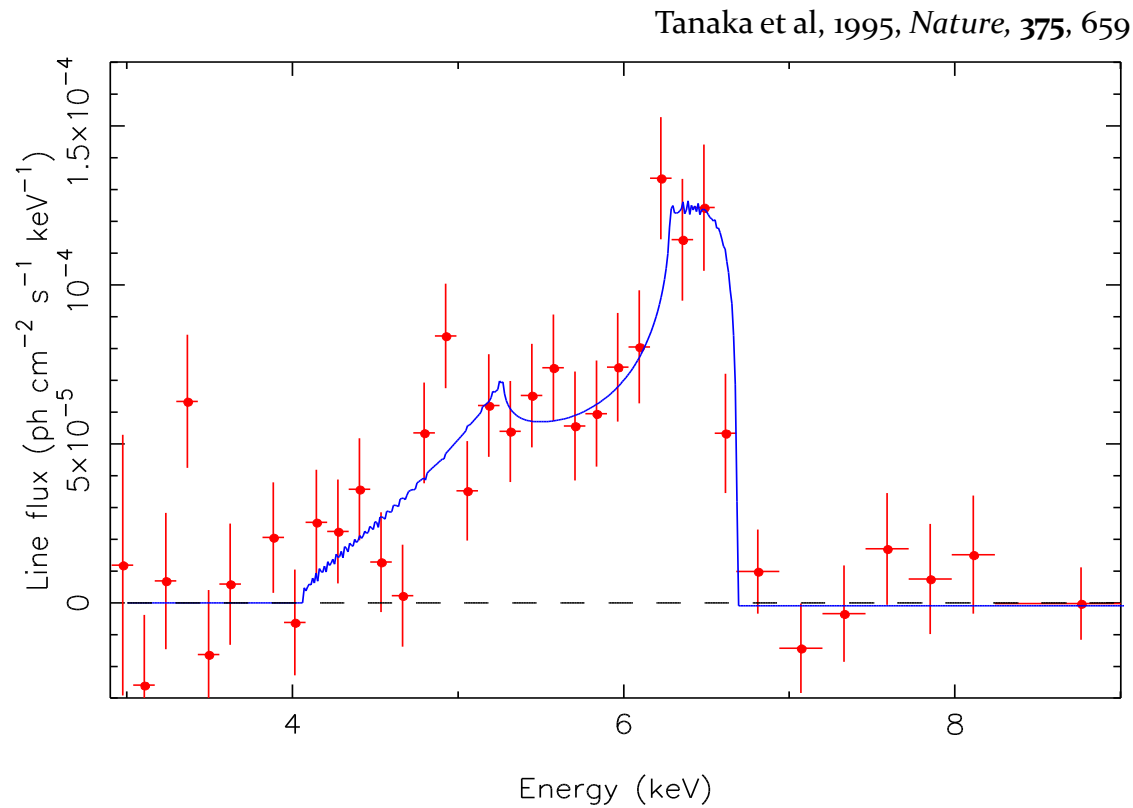
SOHO MDI  
1996 May 24 00:00UT  
31-minute filter



# Supermasivne crne rupe

Fabian, A. C. 2006, *AN*, 327, 943

## ► *Fe K $\alpha$* linija u spektru

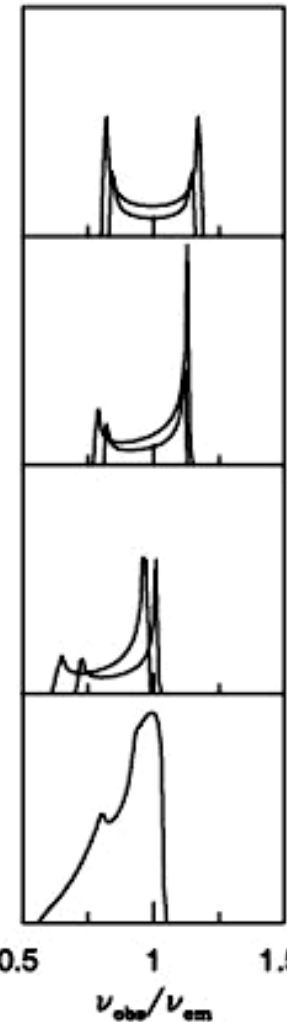


Newtonian

Special relativity

General relativity

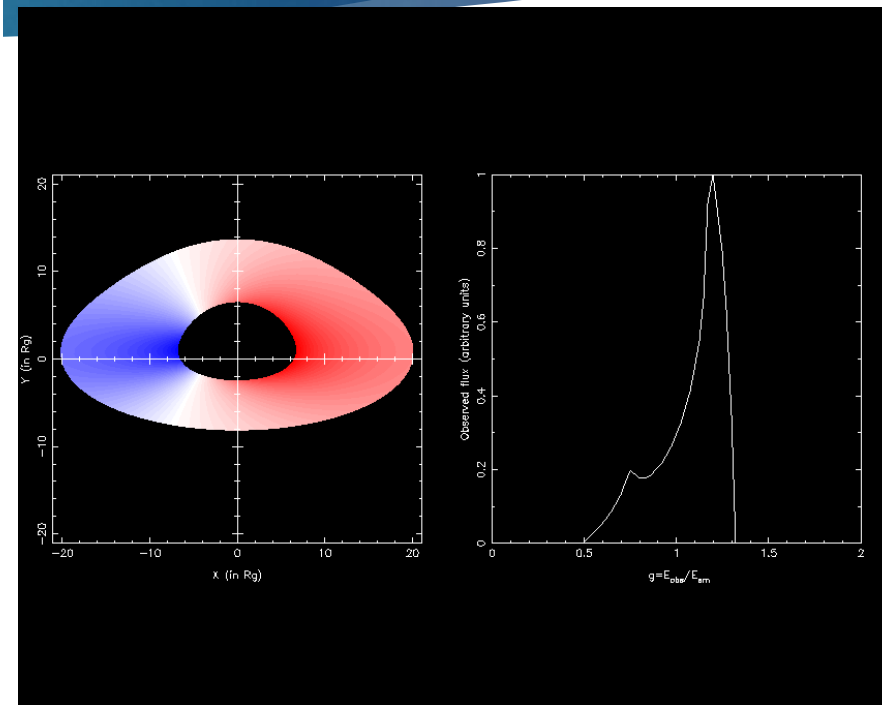
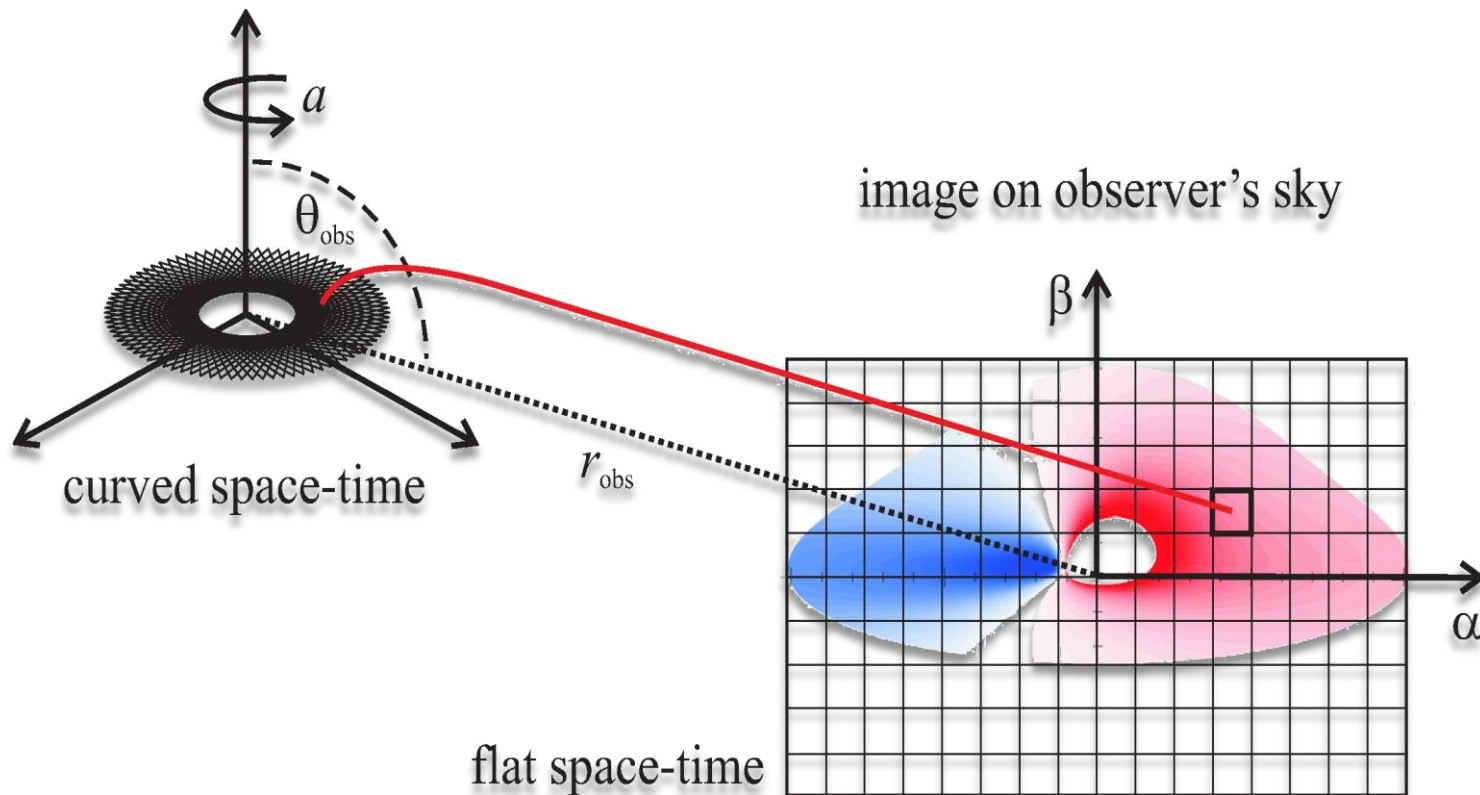
Line profile



Transverse Doppler shift  
Beaming

Gravitational redshift

# Supermasivne crne rupe



M. Milošević, M.A. Pursiainen, P. Jovanović, L.Č. Popović, Int. J. Mod. Phys. A. 33 (2018) 1845016.

P. Jovanović, New Astron. Rev. 56 (2012), pp. 37 - 48.

L. Popović, P. Jovanović, E. Mediavilla, A.F. Zakharov, C. Abajas, J.A. Munoz, G. Chartas, ApJ 637 (2006), pp. 620 - 630.

L. Popović, E.G. Mediavilla, P. Jovanović, J.A. Munoz, A&A 398 (2003), pp. 975 - 982.

A. Čadež, C. Fanton, M. Calvani, New Astron. 3 (1998), pp. 647 - 654.

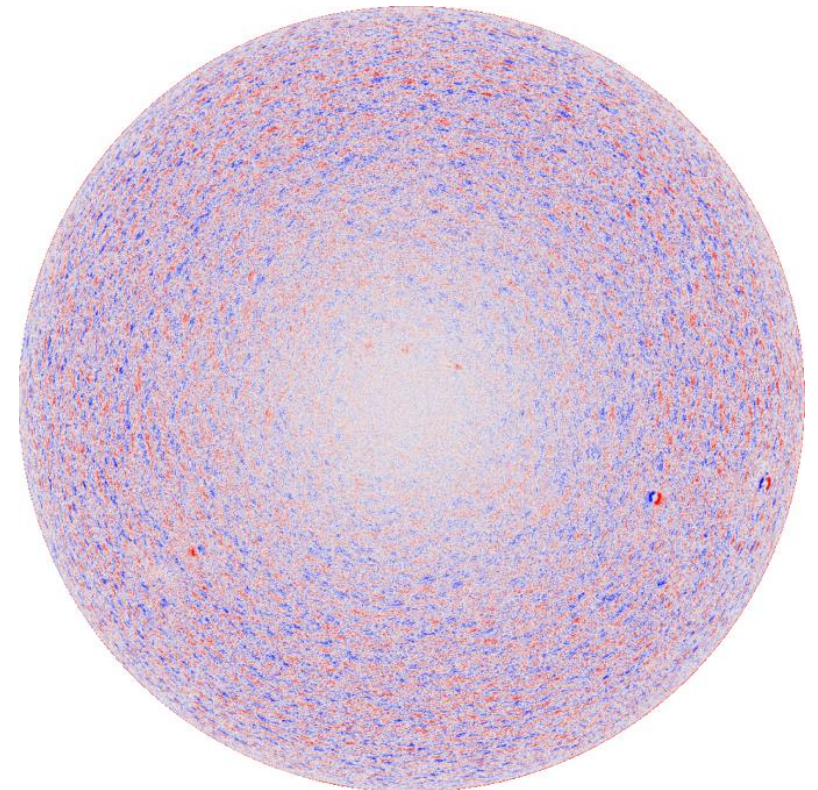
# Termalno kretanje

- ▶ Širenje spektralnih linija
  - ▶ čestice koje se kreću ka **unutrašnjosti** "šire" spektralnu liniju ka **crvenom**, a čestice koje se kreću ka **spoljašnjosti** zvezde ka **plavom** delu spektra

$$\Delta v = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

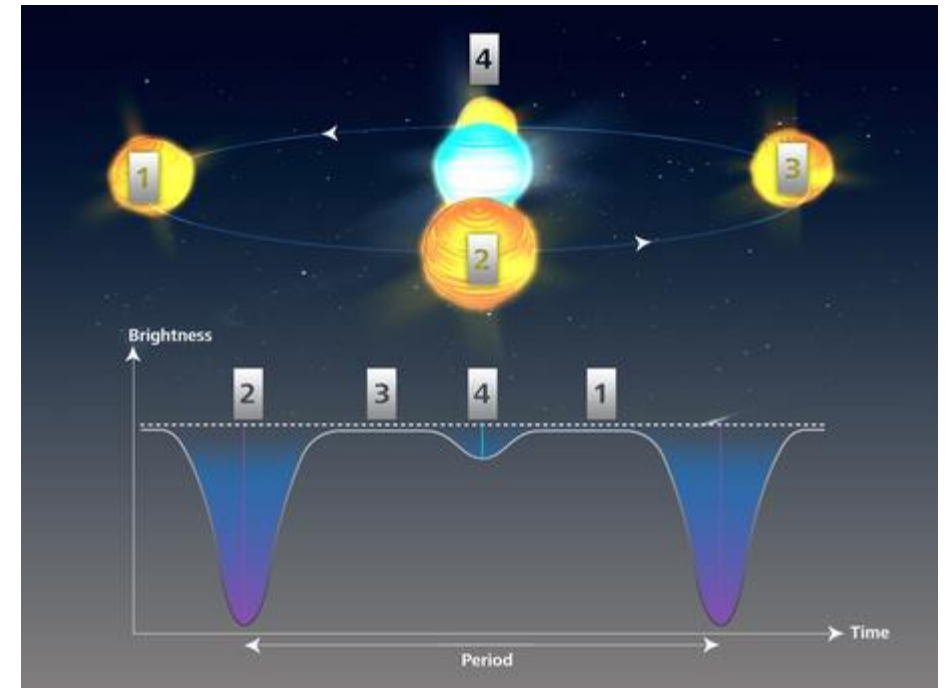
$$\Delta v = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + u_{turbulencije}^2}$$

- ▶ Na sličan način se objašnjava i deformisanje spektralnih linija granula na Suncu koje "tonu" i "isplivavaju".



# Dvojne zvezde / ekstrasolarne planete

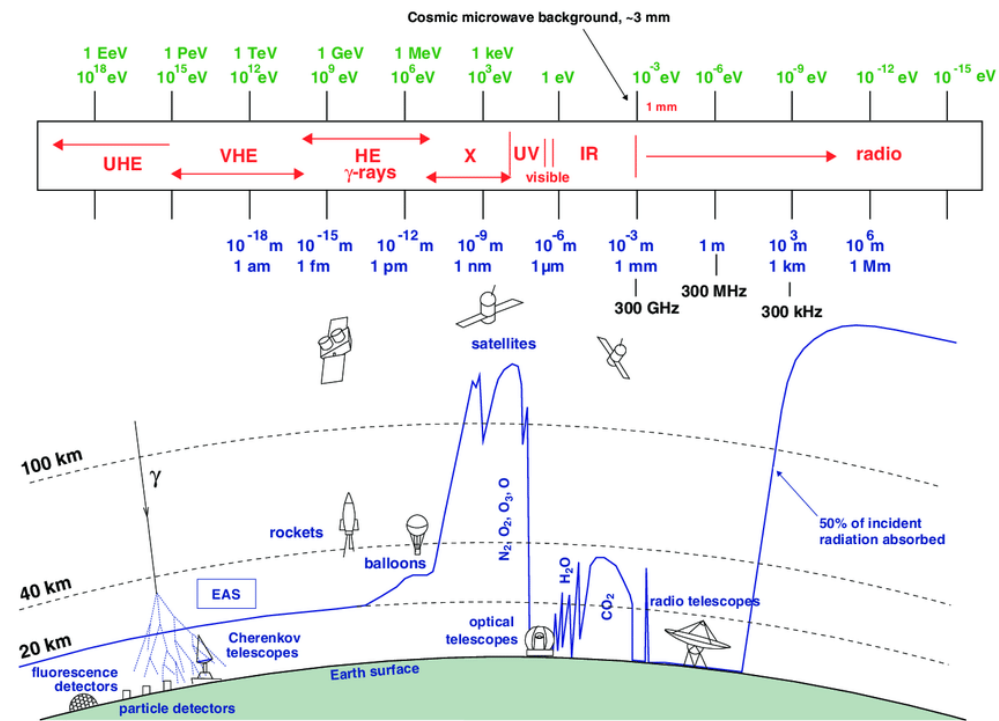
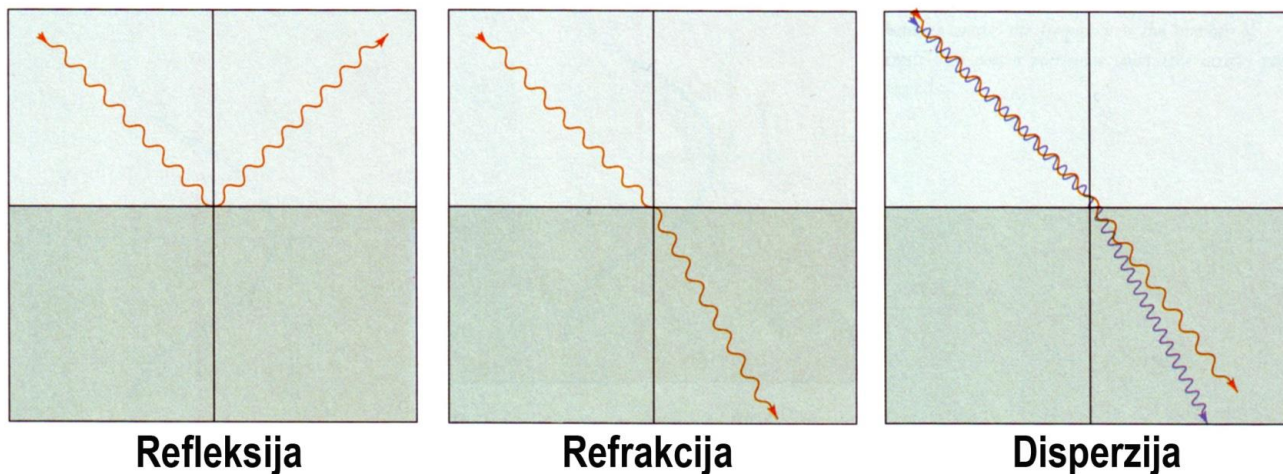
- ▶ Jedna od metoda detekcije planeta oko drugih zvezda zasniva se na merenju intenziteta zračenja zvezde.
- ▶ Prilikom eklipse dolazi do smanjenja intenziteta zračenja sa zvezde.
- ▶ Na taj način je detektovana i atmosfera planete koja orbitira oko udaljene zvezde.





# Uticaj Zemljine atmosfere

- ▶ Prilikom prolaska zračenja kroz Zemljinu atmosferu dolazi do njegove apsorpcije, rasejanja (refleksije, refrakcije i disperzije).
  - ▶ Znatno otežava posmatranja nebeskih tela.
  - ▶ Primjenjuju metode vanatmosferske astronomije.

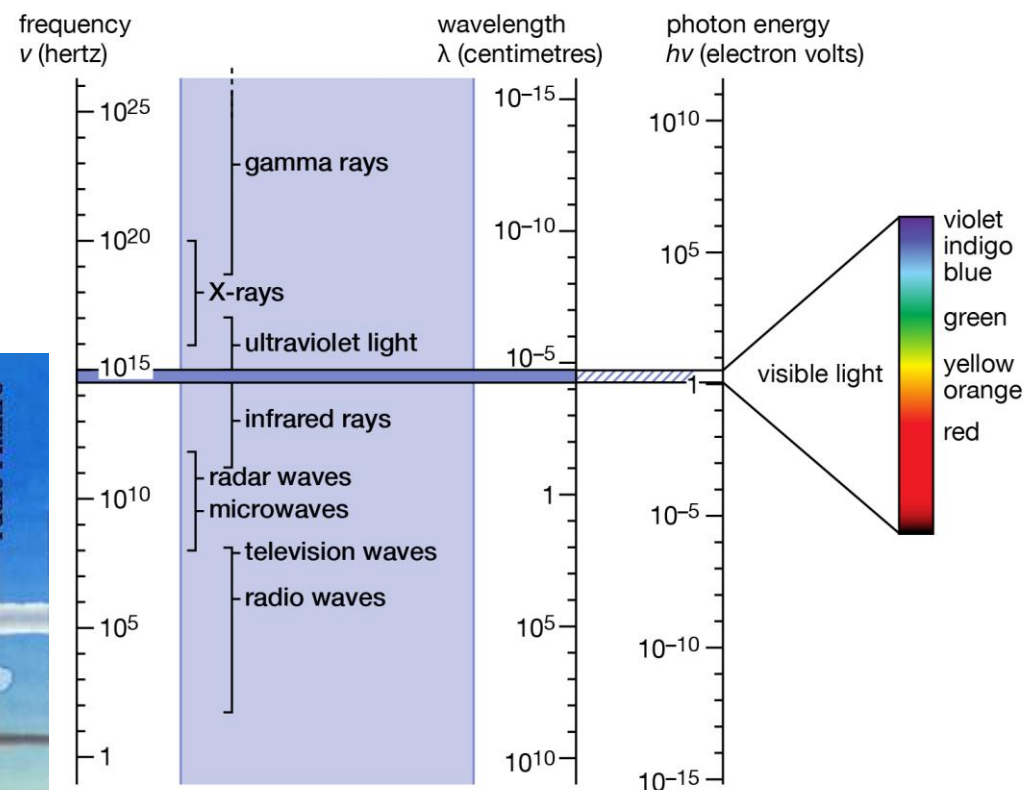
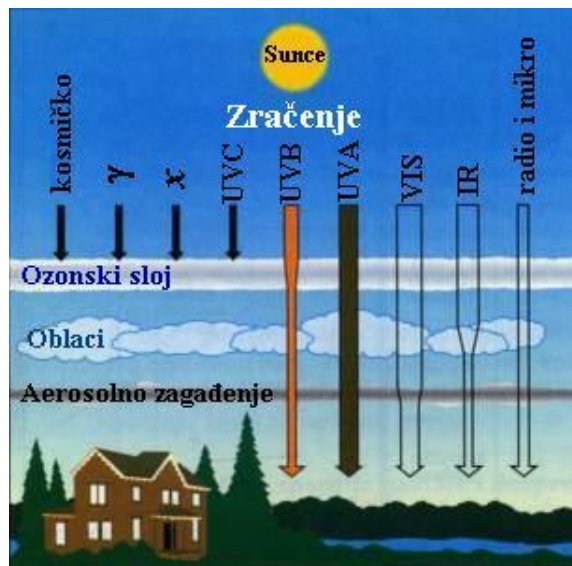


# Rejljev zakon

- ▶ Veliki deo EM zračenja (gama, X, mikrotalasno) rasejava se na česticama atmosfere prema Rejljevom zakonu

$$I \sim \frac{I_0}{\lambda^4}$$

- ▶ Gde su  $I_0$  i  $I$  intenziteti zračenja pre ulaska u atmosferu i intenzitet rasejanog zračenja
- ▶ Svetlost **kraćih** talasnih dužina **više** se rasejava!



# Uticaj Zemljine atmosfere



- Dolazi i do izmene spektra svetlosti koja sa kosmičkog objekta dolazi do površine planete

