

# Teorija Zvezdanih Spektara

## Lekcija 1: Uvod u Kurs

Ivan Milić (AOB / MATF)

13/10/2023



# Čime se bavi ovaj kurs

- **Teorija Zvezdanih Spektara:** Zvezdane Atmosfere, Prenos Zračenja, Radijativni Procesi, Atomi i Molekularni Procesi...
- Bavimo se interakcijom između zračenja (**fotona**) i materije (**atoma, jona, molekula, elektrona**)
- Materija utiče na zračenje (**zrači**), ali i zračenje utiče na materiju (**eksitacija, jonizacija, pritisak zračenja, grejanje, hladjenje...**)
- Naš zadatak je da opišemo ovu interakciju (spregnutost) u oba smera, i da vidimo kako ista utiče na ono što posmatramo (spektre), ali i na fiziku zvezdanih atmosfera ali i astrofizičku plazmu uopšte
- Prirodan nastavak **fizike astrofizičke plazme**, na ovaj kurs se nastavlja **interpretacija astronomskih spektara (master kurs)**

# Šta treba da znamo

- Osnove kvantne i statističke fizike
- Najosnovniju matematičku analizu
- Osnove elektromagnetizma, optike, opšte astrofizike

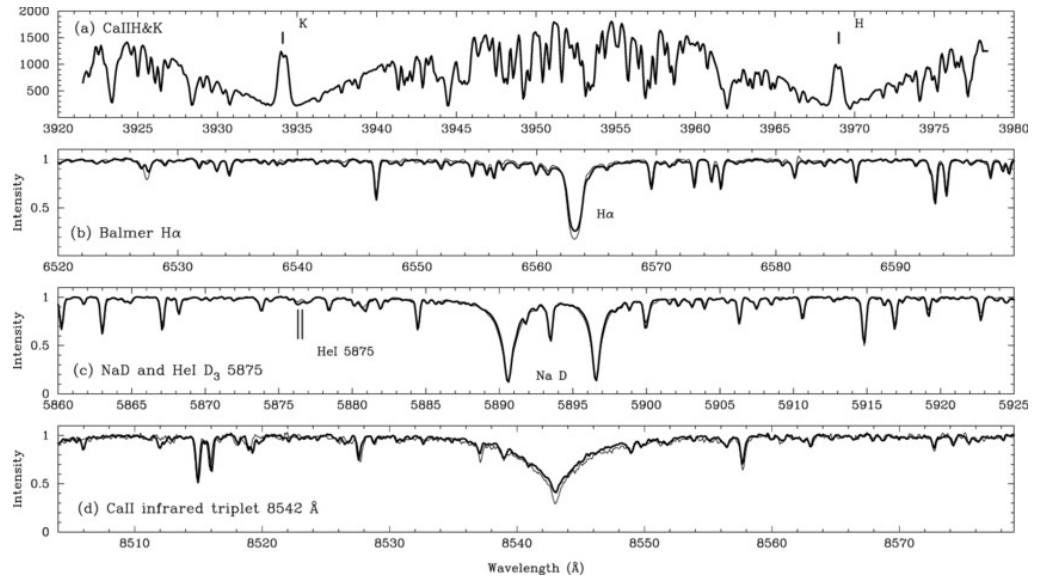
## **Za vežbe:**

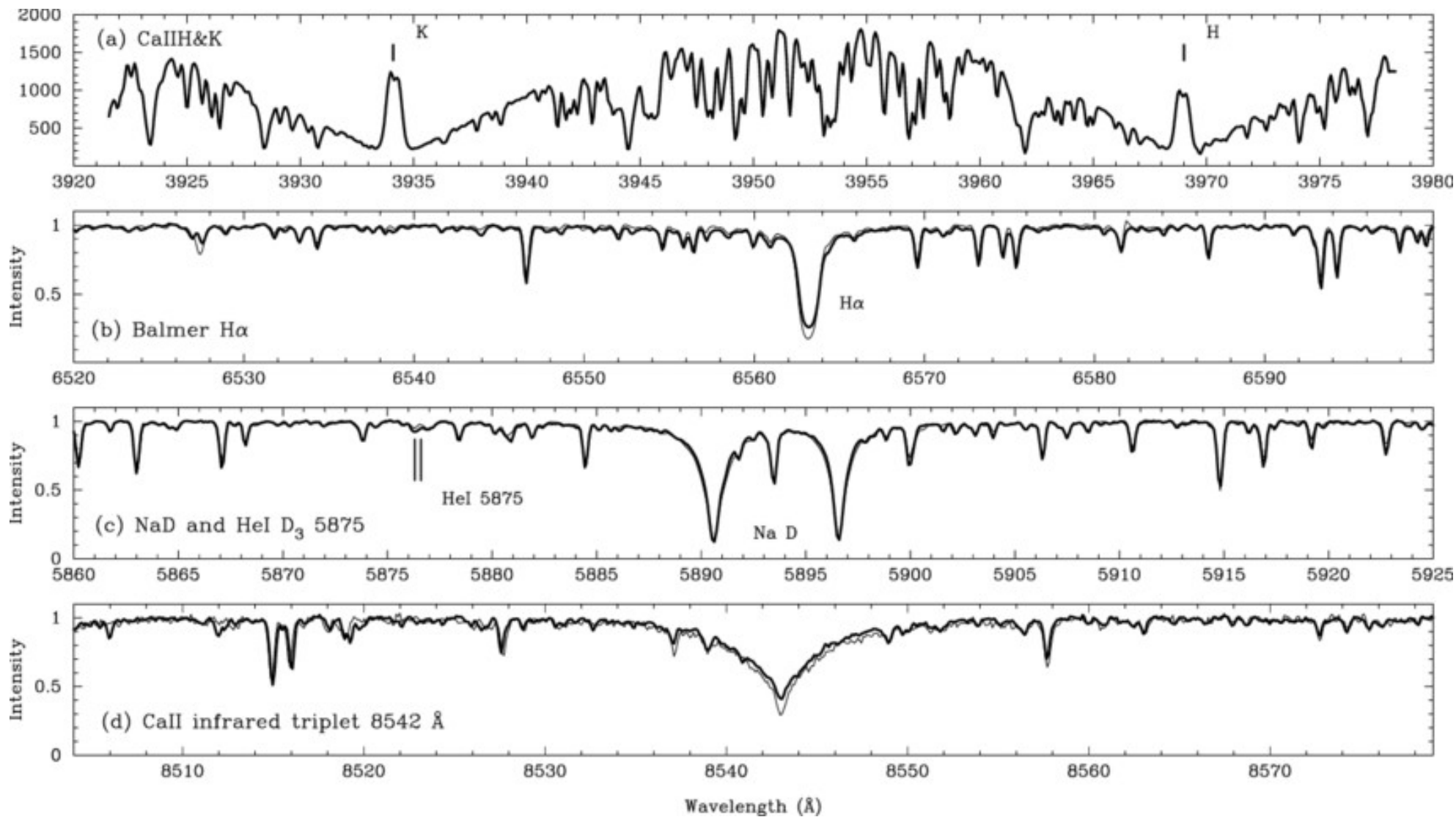
- Poželjno je da znamo python (ostali jezici su naravno OK)
- Osnove numeričke matematike (npr. iz obrade astronomskih posmatranja)

# Šta posmatramo?

- **Spektar:** Spektralnu raspodelu zračenja zvezde, integrisanu po vidljivoj strani zvezdanog diska.
- U slučaju razlučenih izvora (Sunce npr): Spektralnu raspodelu zračenja datog površinskog elementa
- **Izlazni** spektar je određen fizičkim uslovima ali zračenje **unutar** atmosfere utiče na samu atmosferu!

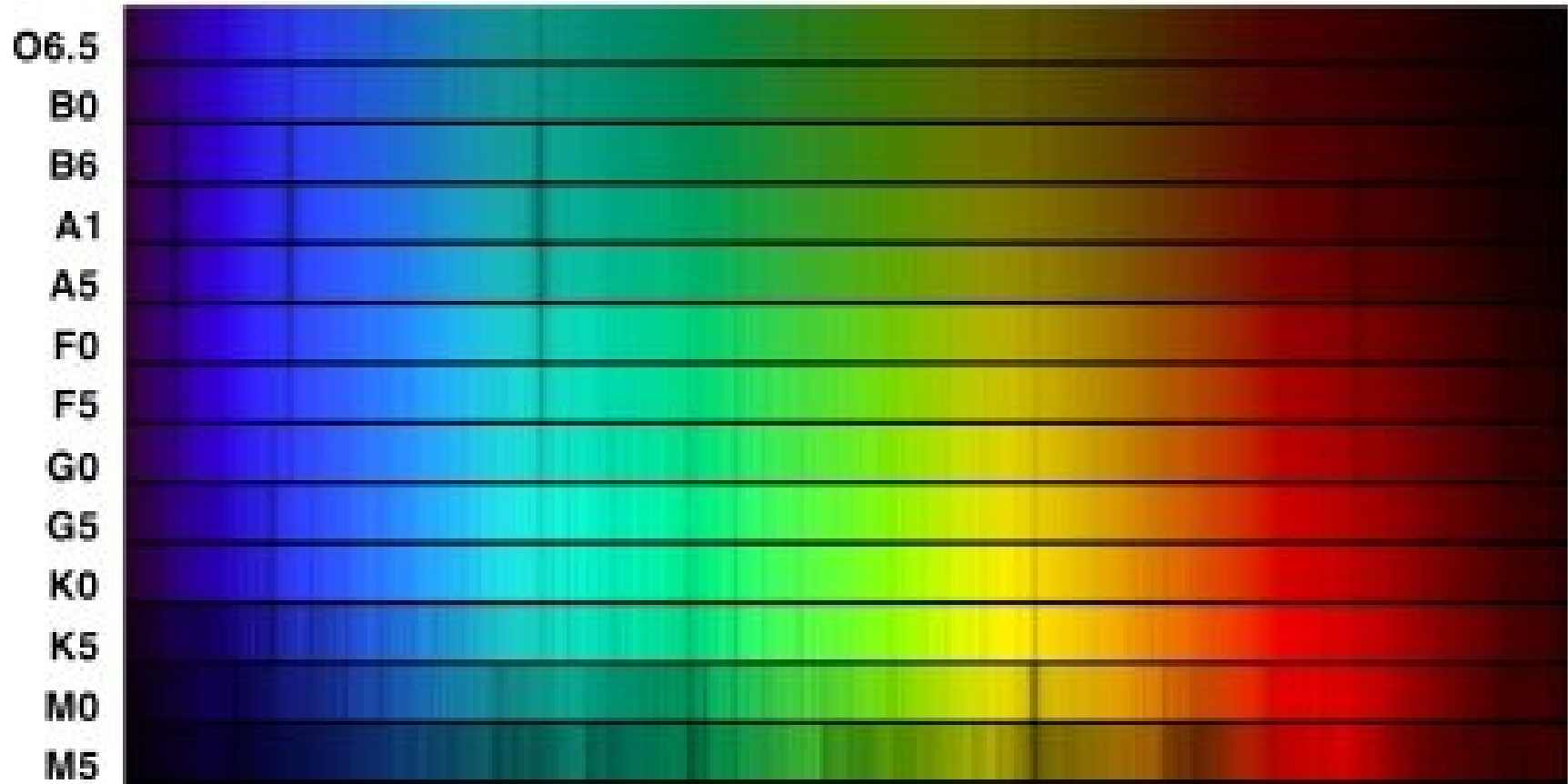
Nekoliko delova spektra zvezde EK Eridani – obratite pažnju na razlike među raznim spektralnim linijama!





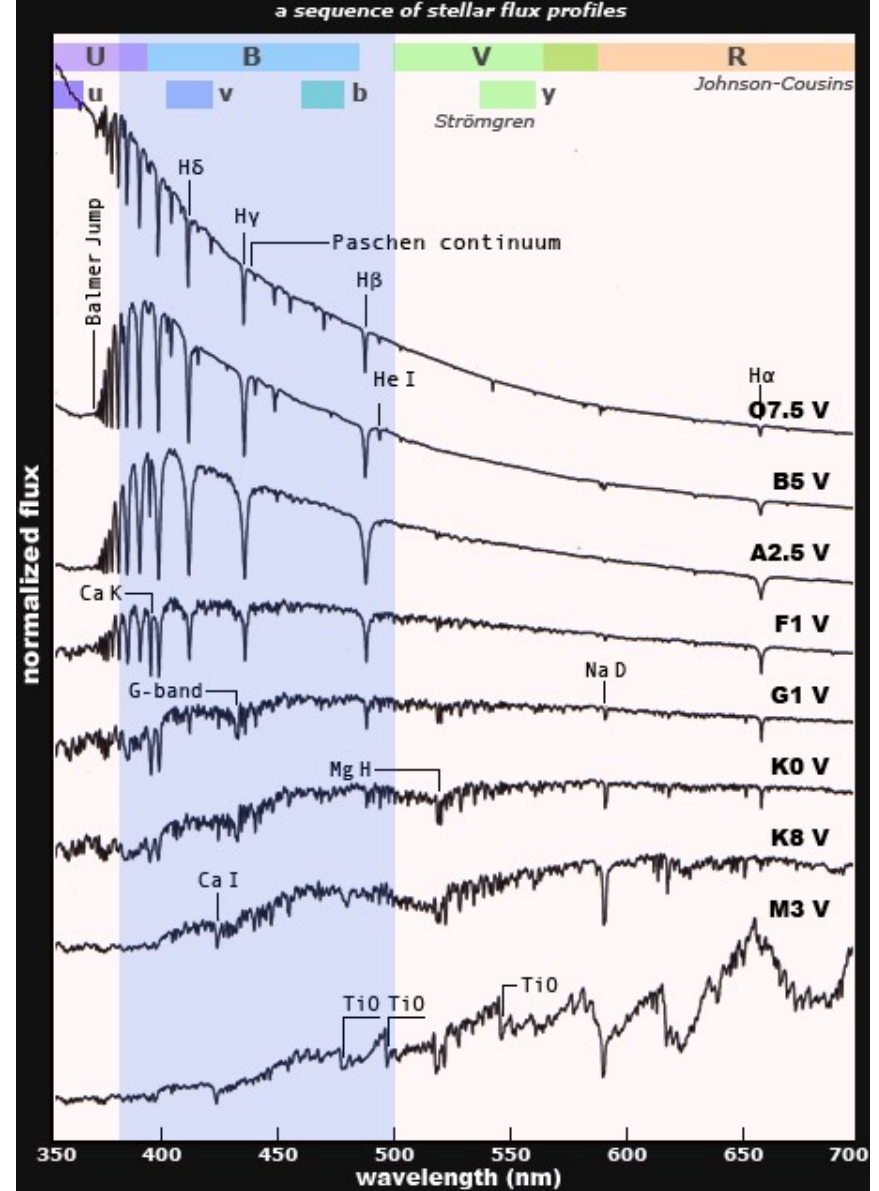
# Spektri različnih zvezd

- Oslikavaju razlike, u njihovim fizičkim karakteristikama (5 min diskusija)



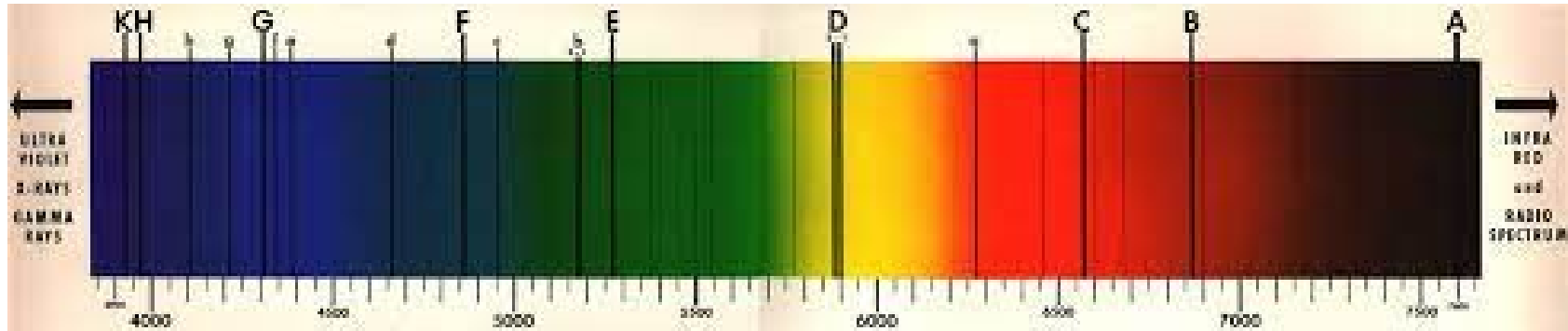
# Spektri različitih zvezda

- Različite spektralne klase imaju različit nagib kontinuuma, jačinu i oblik spektralnih linija
- Obratite pažnju na tzv. Balmerov skok
- Takodje, nijedna od ovih zvezda nije crno telo!
- (Da li se neko seća zašto?)



# Počeci spektroskopije: Fraunhofer

- Poznat po Fraunhoferovoj difrakciji
- **1814** je posmatrao spektar Sunca (William Wollaston je verovatno posmatrao pre njega) i imenovao tzv. Fraunhoferove linije
- Spektar Sunca je sličan spektrima zvezda → **Sunce je zvezda**
- **1859** – Spektralna analiza i identifikacija hemijskih elemenata



- 1913 Borov model atoma i prvi pokušaj da se spektralne linije teorijski objasne!



# Kirchhoff i Bunsen

- Uspostavili vezu izmedju hemijskih elemenata i njihovih spektralnih karakteristika
- Razvili posmatračke i laboratorijske metode kako da uporede spektre zvezda sa spektrom gasova
- Kirchhoff je, postavio temelje prenosa zračenja i **predvideo postojanje koncepta zračenja crnog tela kao opštog zakona za tela u termalnoj ravnoteži** (pokrićemo na vežbama)

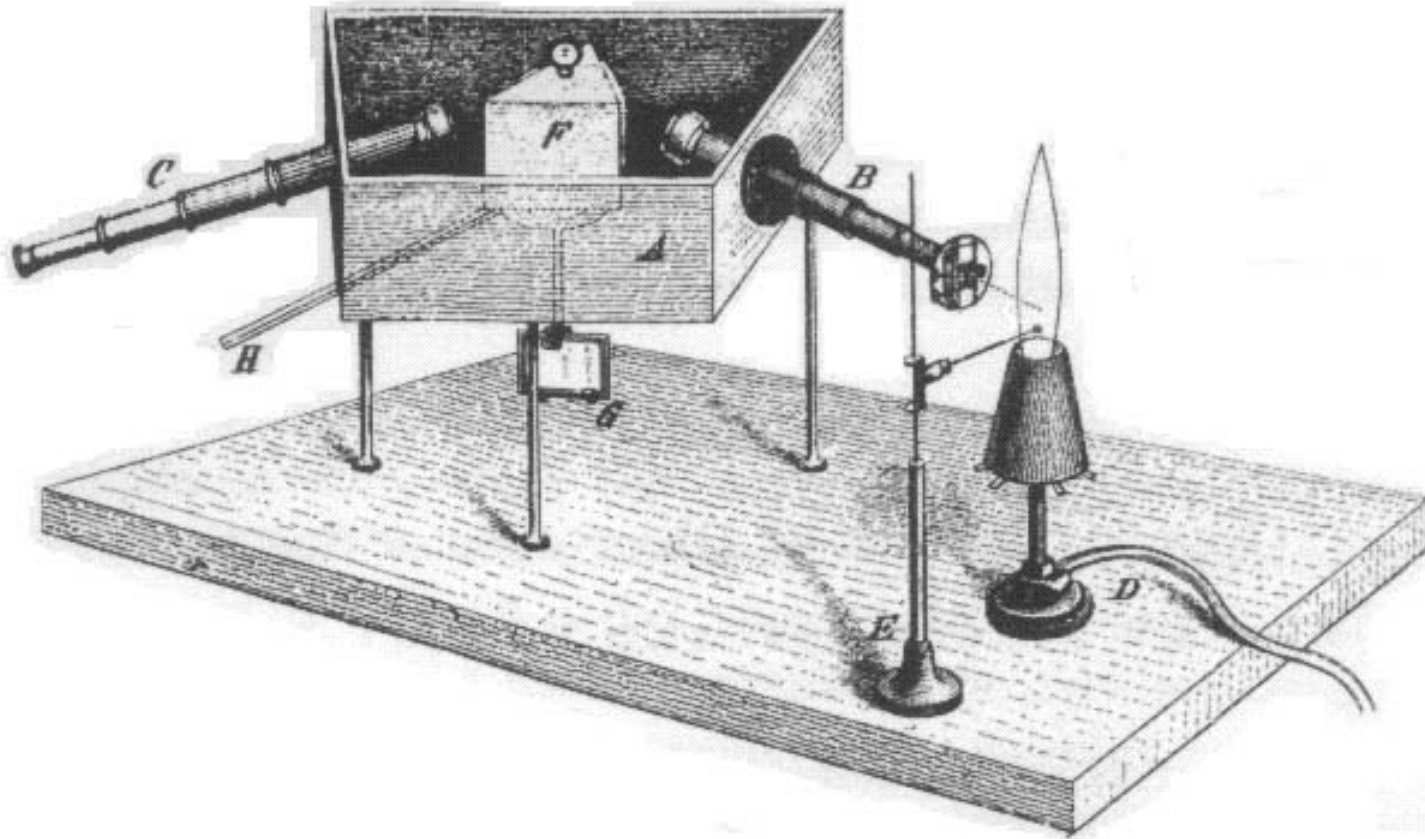
## Kirchhoff and Bunsen



Heidelberg, **1859**

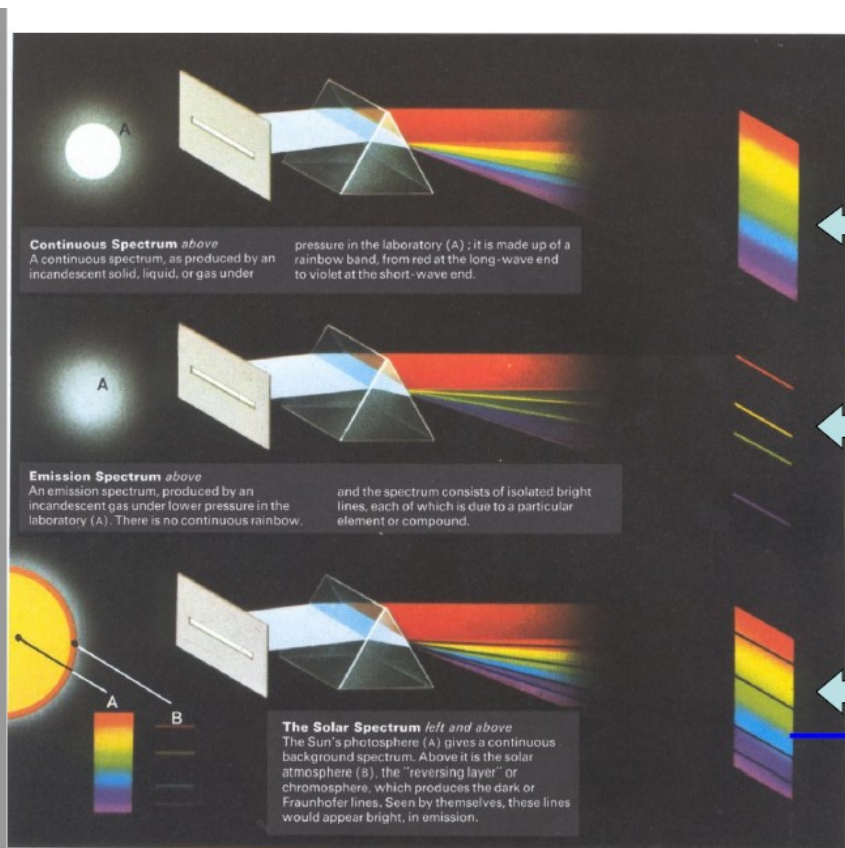
# Kirchhoff i Bunsen

“Bunsen Burner”



# Kirchhoff i Bunsen

## “Opisna” teorija prenosa zračenja

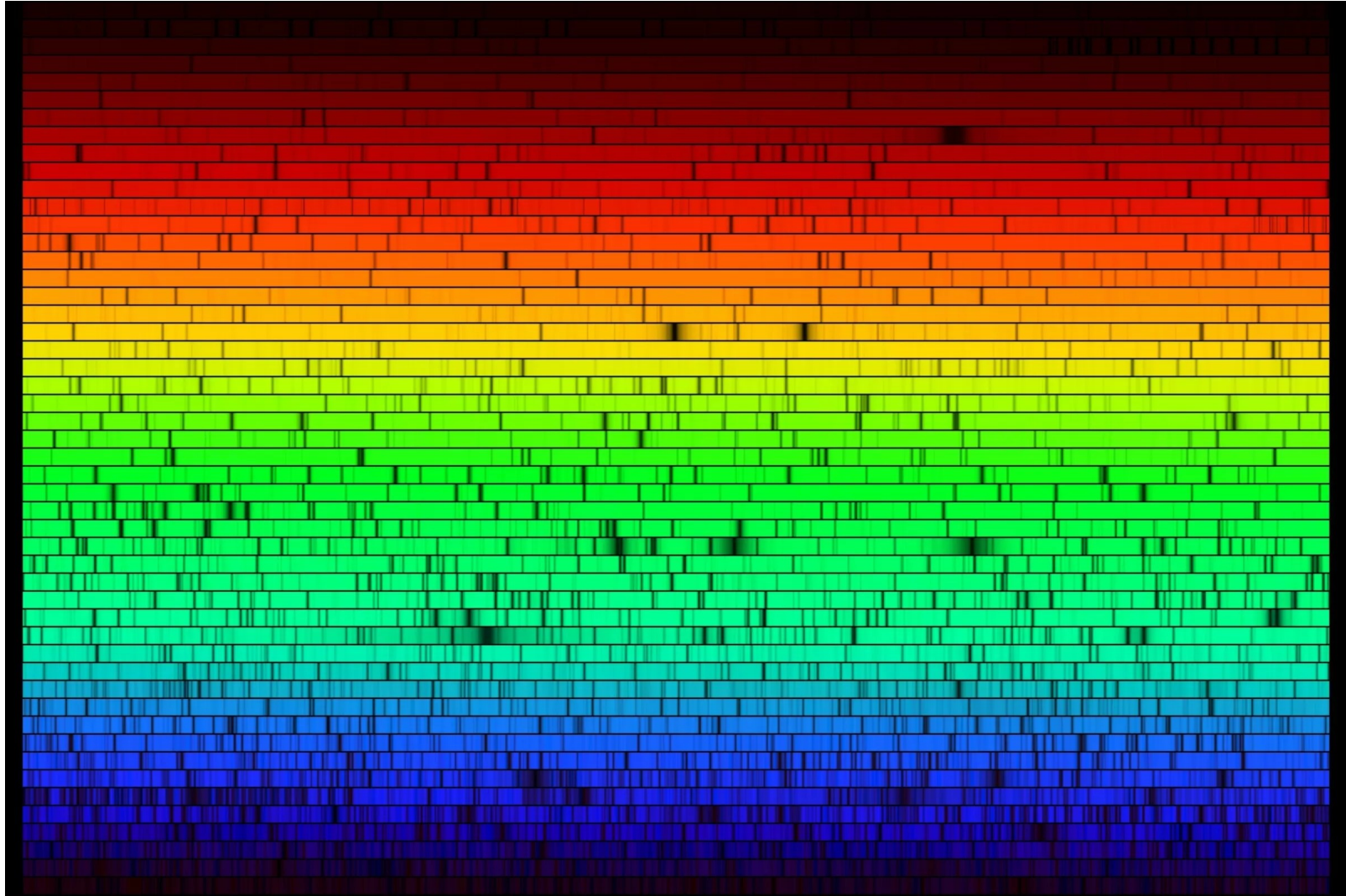


### Kirchofovi zakoni (1860)

- 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.**

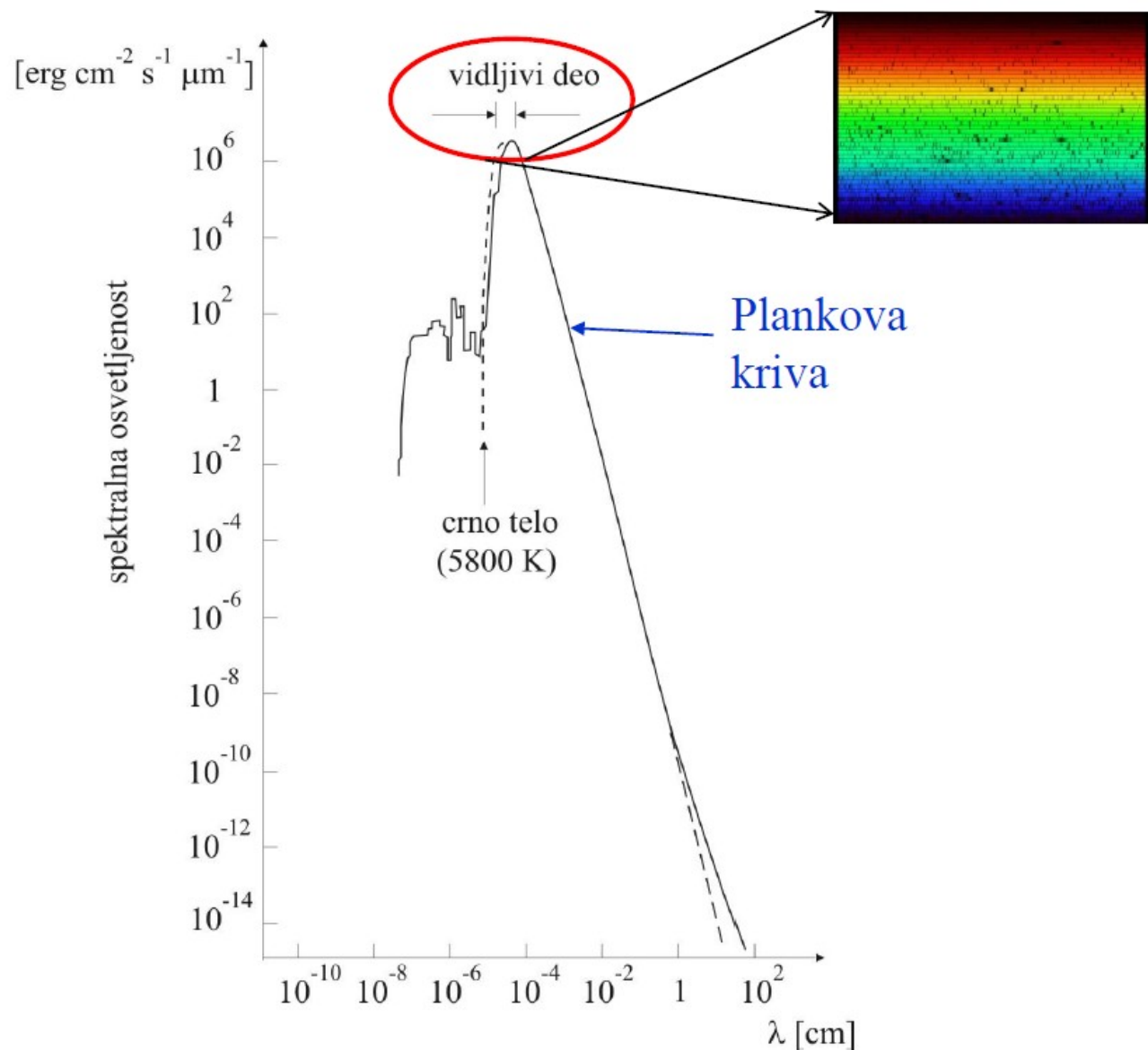
Najlepši spektar ikada (ili bar najdetaljniji)





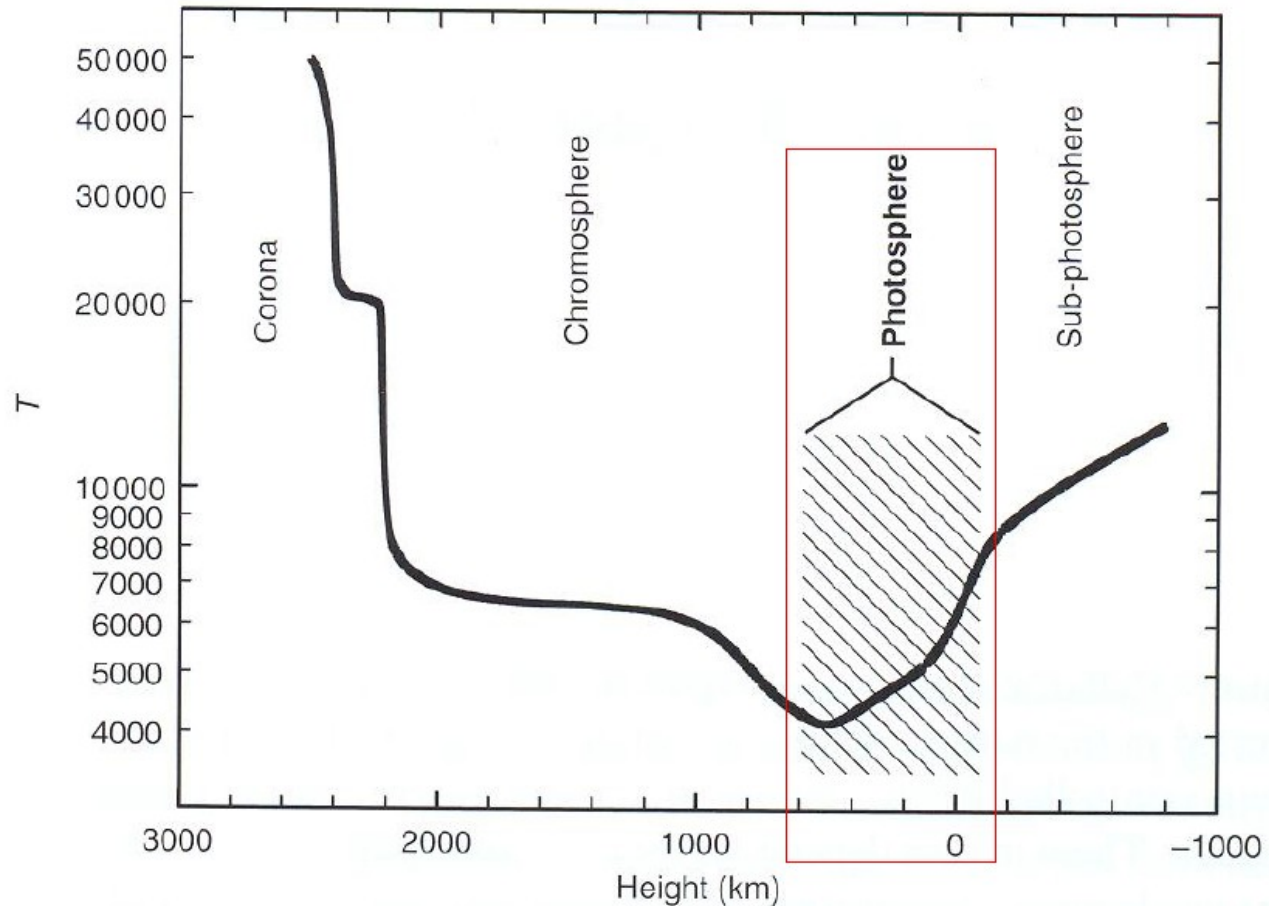
# Spektar Sunca

- Nije crno telo!
- Da li neko ima ideju za ultraljubičastog zračenja ima više nego kod crn tela?



# Model sunčeve atmosfere

- Na osnovu detaljne analize (modelovanja) Sunčevog spektra, dobijena je raspodela temperature u Sunčevoj atmosferi
- Cilj našeg kursa je da shvatimo kako smo došli do ovog grafika!
- Gde je "nula"?  
**(3 min diskusija)**



# Temperatura

- Temperatura je najvažnija fizička veličina za izgled spektra jedne zvezde
- Zašto? (5 + 5 minuta za diskusiju)

# Temperatura

- Temperatura je najvažnija fizička veličina za izgled spektra jedne zvezde
- Utiče na jonizaciju
- Postojanje molekula
- Eksitaciju
- Širenje linija
- Količinu sudara



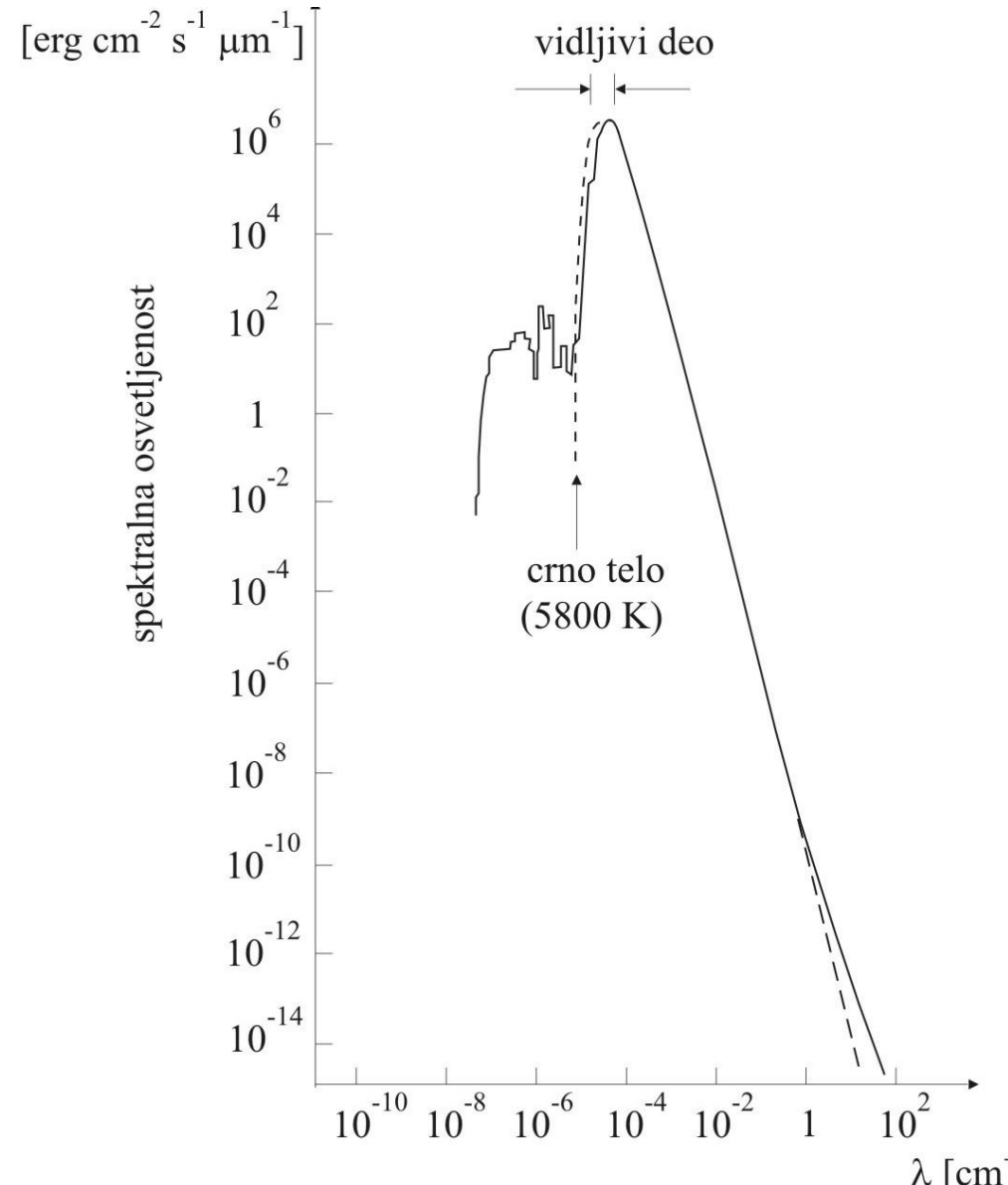
# Harvardska klasifikacija

- Znali smo da se zvezde razlikuju, ali nismo znali zašto!
- Logična pretpostavka: zbog **hemijskog sastava!**
- Tačno, ali ne u bukvalnom smislu te reči
- Tri zakona zračenja gde temperatura figuriše:

Štefan – Boltzmannov zakon

Wienov zakon pomeranja

Planckov zakon



# Medjutim, nijedan od ovih zakona ne važi

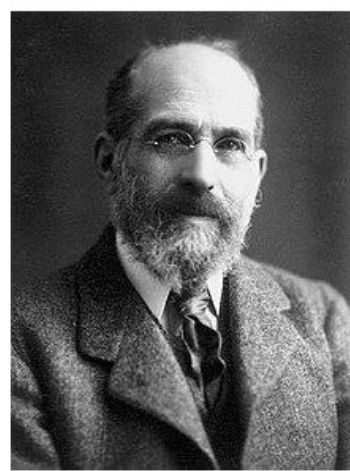
- Zvezde **nisu** crna tela!
- Da jesu, zračenje ne bi napuštalo zvezdu
- Da bi postojao transport energije (fluks), potrebno je da postoji **gradijent temperature** (obratite pažnju na kurs iz fizičkih principa strukture zvezda)
- Da li apsolutno crno telo može da ima spektralne linije? (5 min diskusija)

# Medjutim, nijedan od ovih zakona ne važi

- Zvezde **nisu** crna tela!
- Da jesu, zračenje ne bi napuštalo zvezdu
- Da bi postojao transport energije (fluks), potrebno je da postoji **gradijent temperature** (obratite pažnju na kurs iz fizičkih principa strukture zvezda)
- Da li apsolutno crno telo može da ima spektralne linije?
- Ne može!!! (Tokom kursa ćemo u potpunosti shvatiti zašto)

# Prvi pokušaji da se objasni spektar Sunca

- Radjanje “prenosa zračenja”
- Arthur Schuster, *“Radiation through a foggy atmosphere”*, 1905, ApJ, 21, 1; formulisao jednačinu prenosa i uočio značaj rasejanja
- Karl Schwarcschild (da, onaj koji se bavio crnim rupama), 1914, *“Diffusion and Absorption in Sun’s Atmosphere”*, formulisao razliku izmedju termalne apsorpcije i rasejanja, jednačinu prenosa u integralnom obliku, pokazao da je promena sjaja Sunca od centra ka rubu (limb darkening) i skladu sa radijativnom a ne konvektivnom ravnotežom.



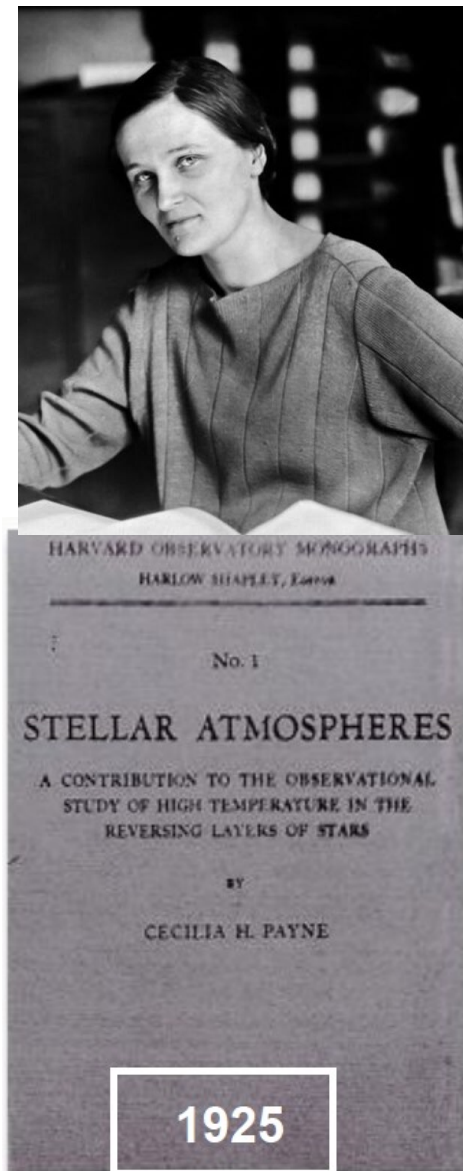
Sir Franz Arthur  
Friedrich Schuster  
1851-1934



Karl Schwarzschild  
1873 - 1916

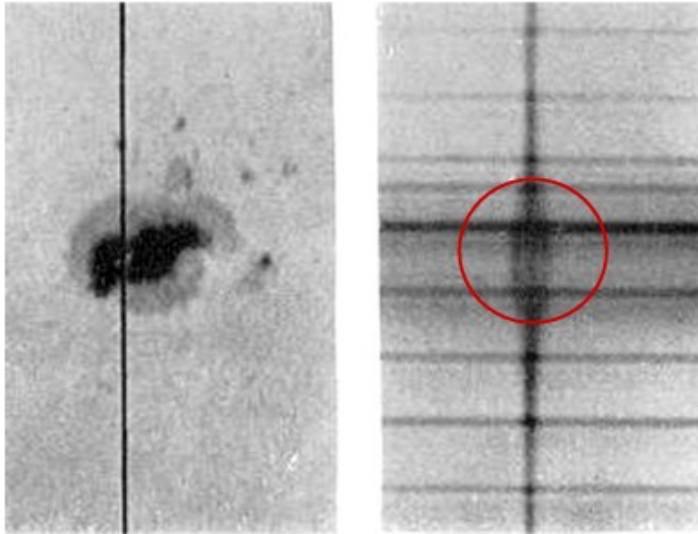
# Objašnjenje Harvardske klasifikacije

- Cecilia Payne – Gaposchkin
- Primenila teoriju jonizacije koju je razvio Meghnad Saha, da analizira zavisnost količine apsorbera od temperature
- Pokazala da su **razlike u prisustvu i jačini spektralnih linija kod zvezda različitih klasa, posledica razlike u jonizaciji odgovarajućih elemenata**
- Praktično, pokazala da je vodonik ipak najzastupljeniji element u zvezdama
- “the most brilliant Ph.D. thesis ever written in astronomy” – Otto Struve

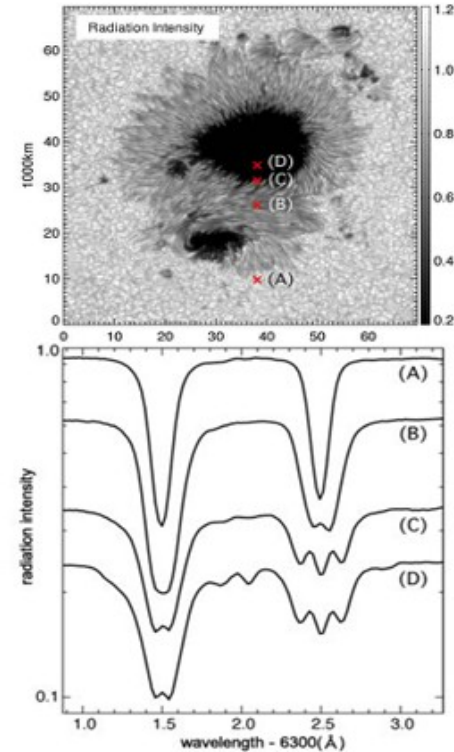


# Zeeman-ov efekat

- 1908, George Ellery Hale je posmatrao Sunčeve pege i uočio sledeću stvar (5 min podsetnik na tehnike astrofizičkih posmatranja)



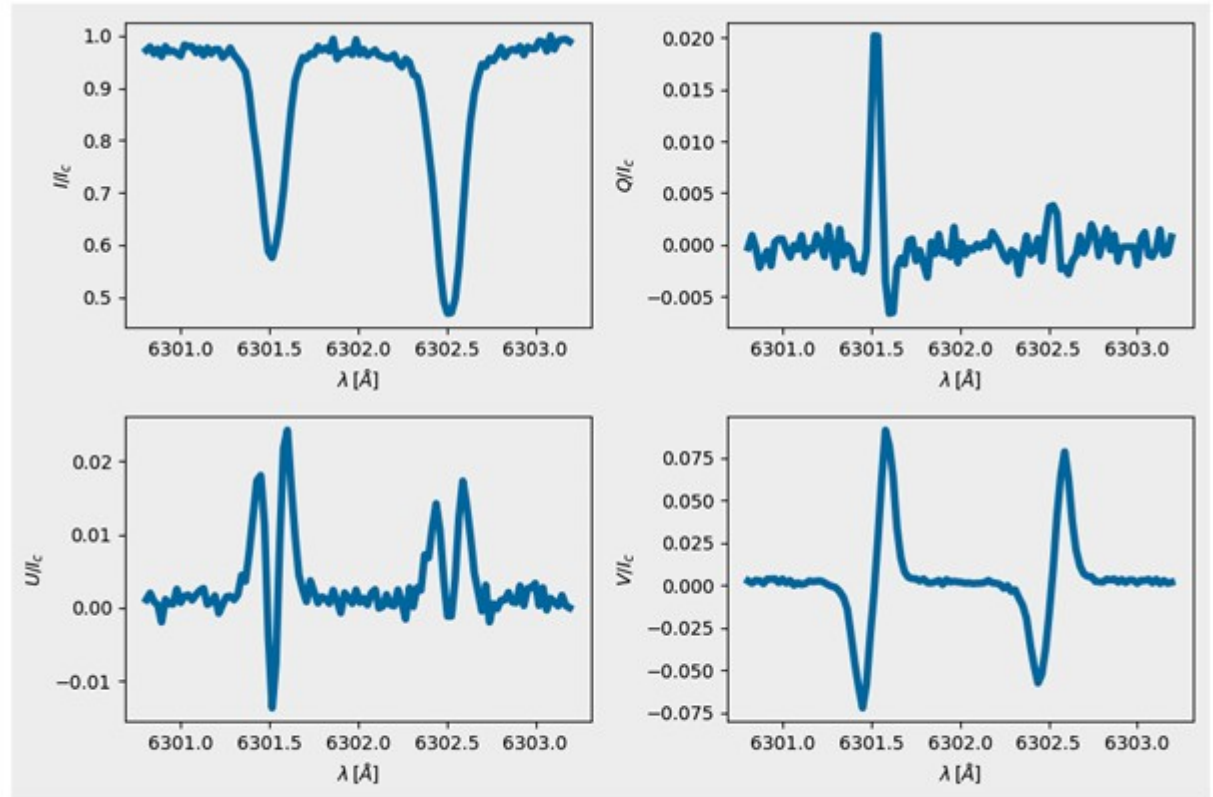
G.E. Hale, F. Ellerman, S.B. Nicholson,  
and A.H. Joy (ApJ, 1919)



Credits: Yukio Katsukawa

# Polarizacija

- Danas, zahvaljujući velikim teleskopima i efikasnim detektorima, posmatramo i polarizaciju u spektralnim linijama: informacije o magnetnom polju i rasejanju



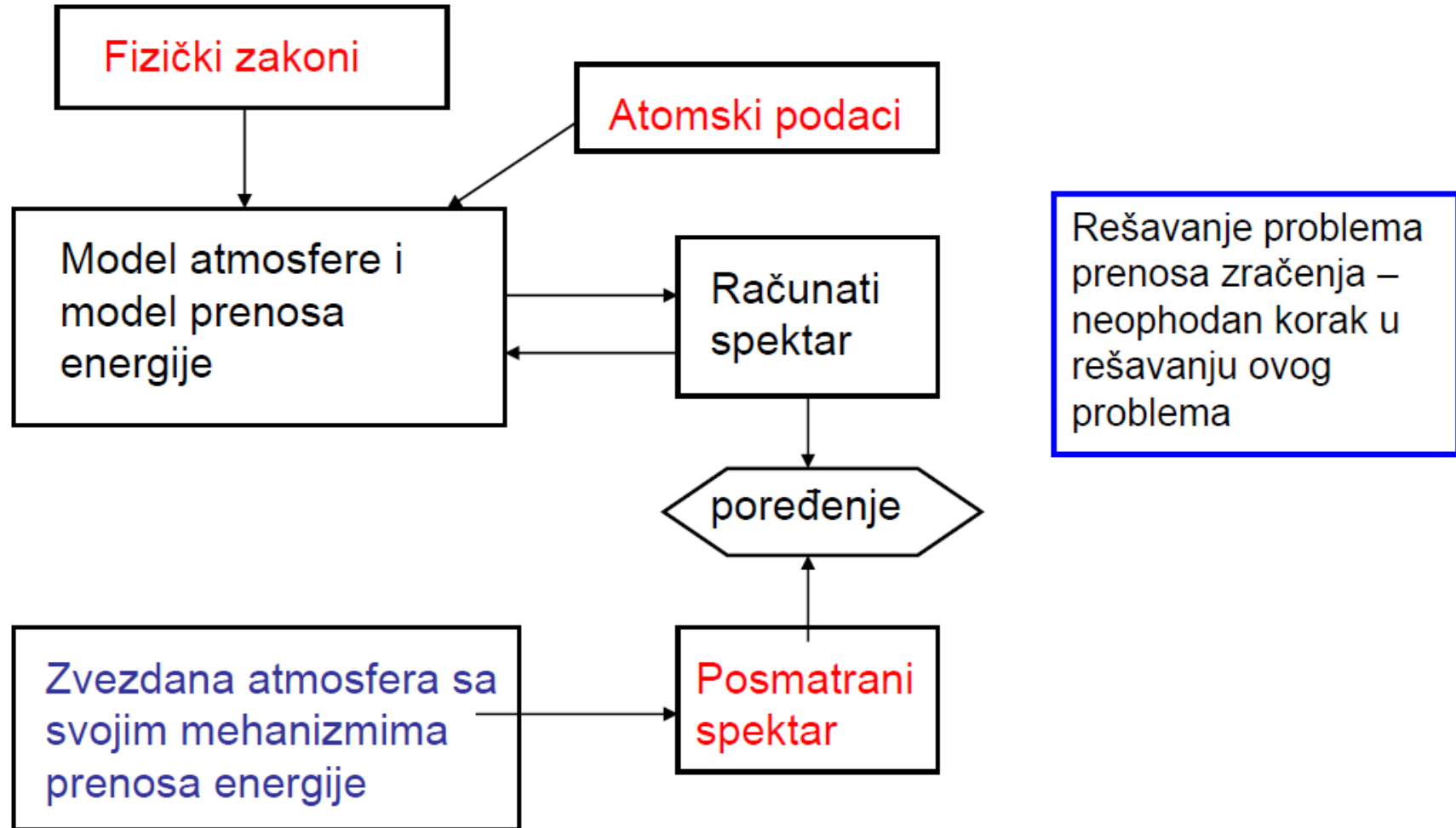
“Quiet-ish” Sun observed with HINODE/SOT SP

# Modelovanje zvezdanih spektara

- Mi danas možemo da odemo mnogo dalje od ovoga
- Možemo da, konzistentno modelujemo interakciju zračenja i materije, da bismo, u isto vreme dobili strukturu atmosfere i njen spektar, za zadate zvezdane parametre i granične uslove
- Ovaj proces je, sem za jako jednostavne slučajeve, ekstremno komplikovan i rešava se isključivo numerički!
- Spaja koncepte iz kvantne, atomske, statističke fizike sa numeričkim metodama za rešavanje nelinearnih sistema i diferencijalnih jednačina

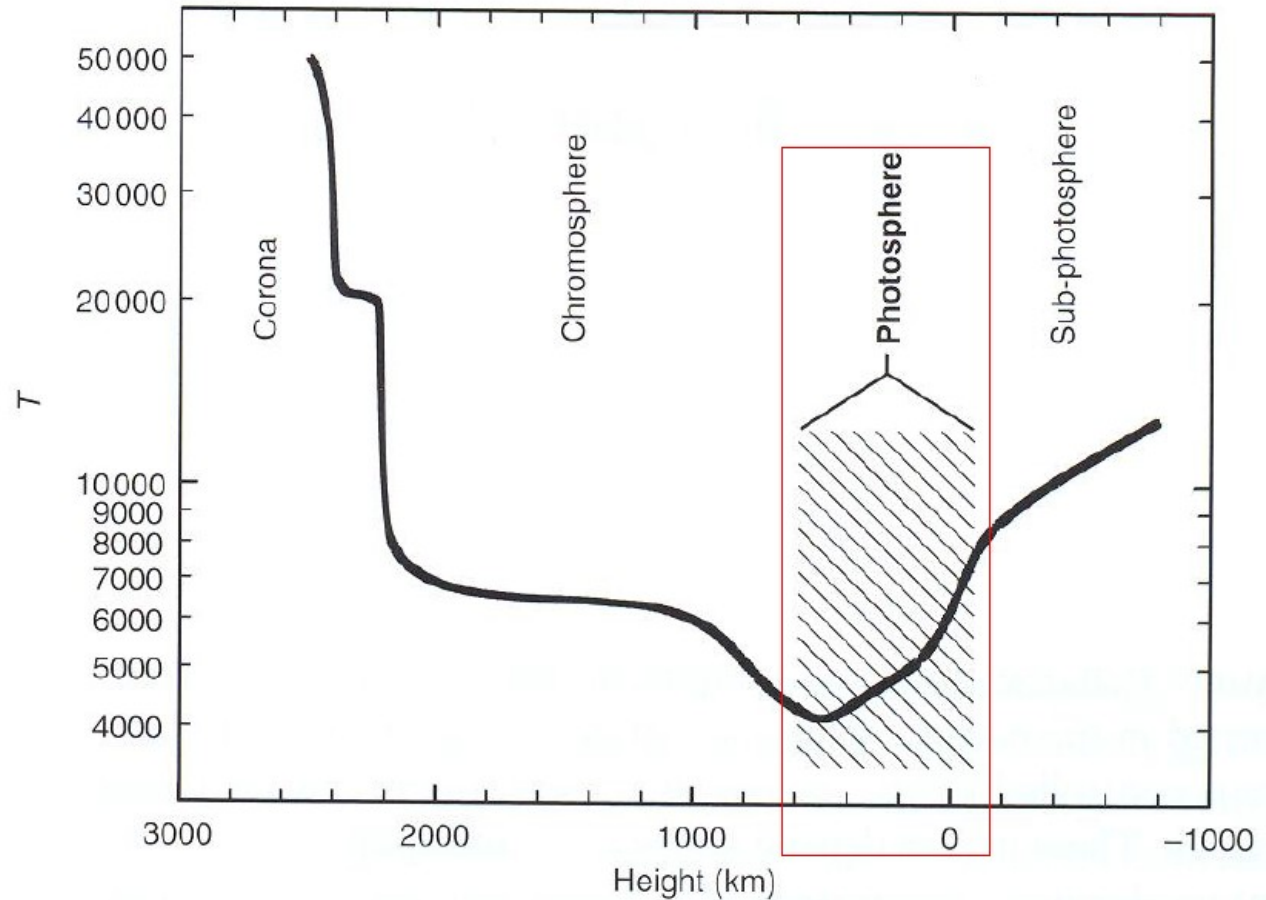


# Modelovanje zvezdanih spektara



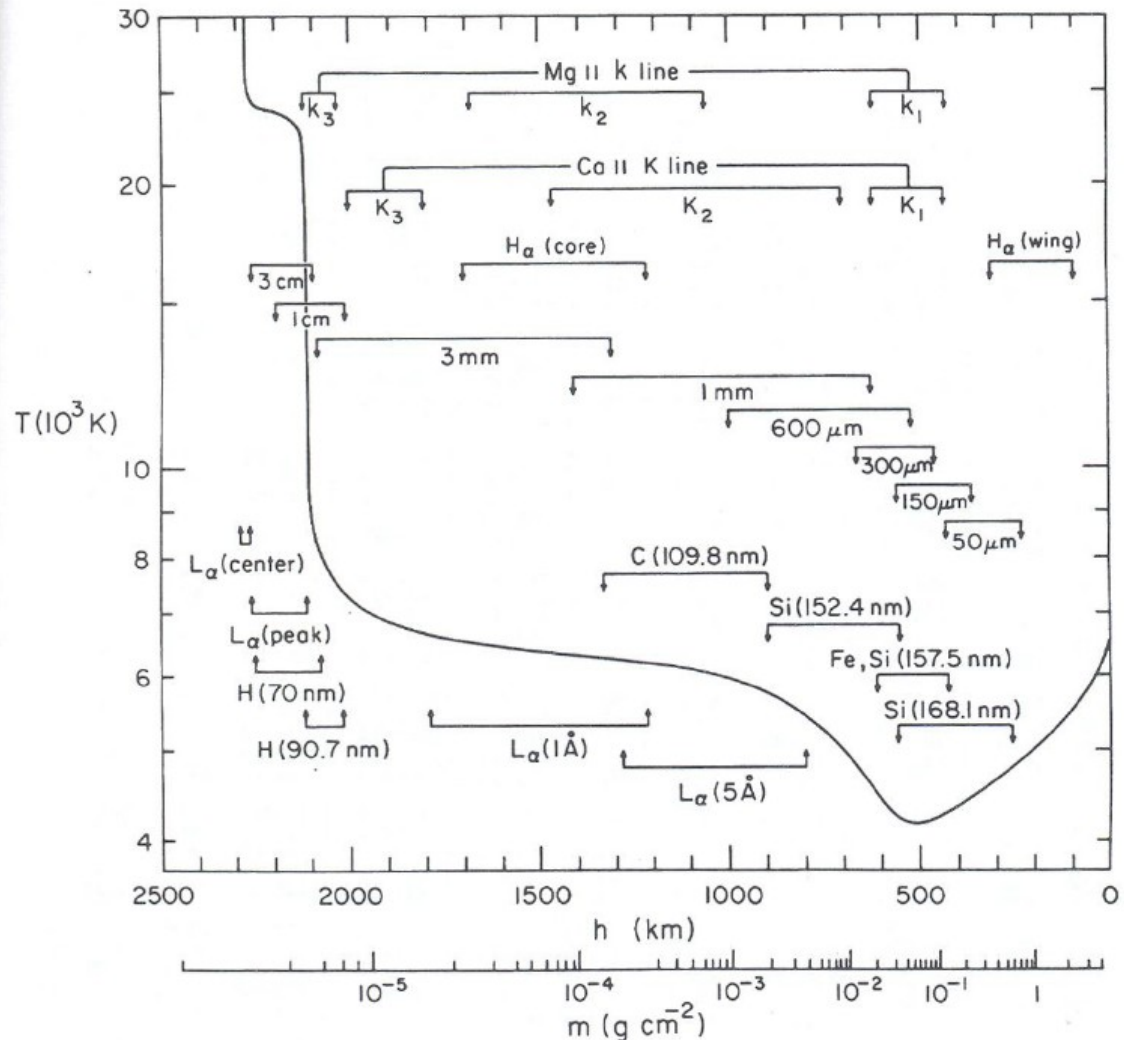
# Šta je, u stvari, zvezdana atmosfera?

- Numeričke vrednosti temperature, pritiska, brzine, magnetnog polja, gustine, itd. za različite dubine (visine)
- Nijedan od ovih parametara nije analitička funkcija, problem je previše komplikovan da bismo dobili jednostavno rešenje!



# Kako dobijamo ovu strukturu?

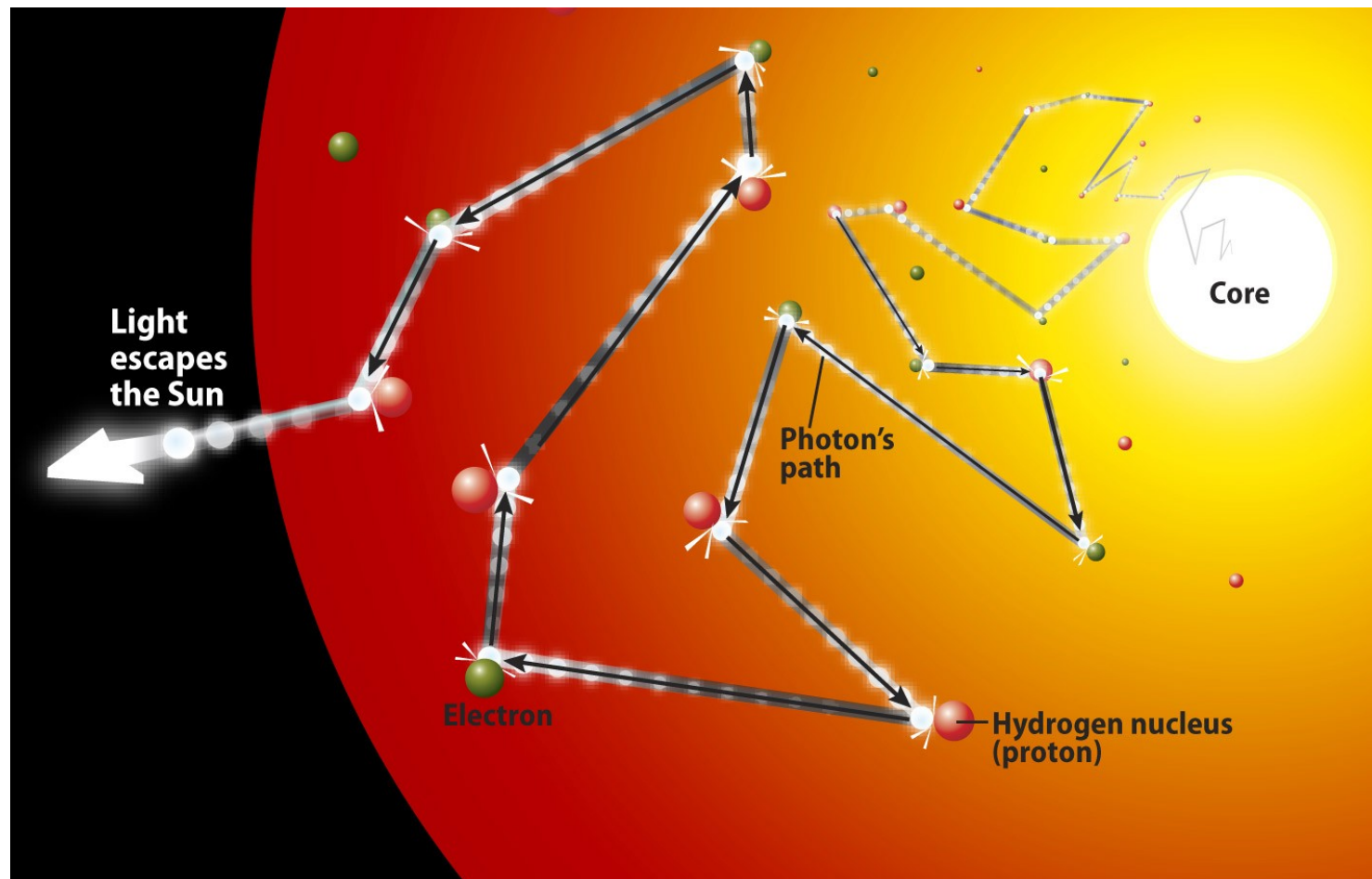
- Različite talasne dužine (i različite spektralne linije), se **formiraju** na različitim visinama u atmosferi.
- Analizom svih njih, simultano, možemo da rekonstruišemo strukturu zvezdane atmosfere



# Šta je, onda, zvezdana atmosfera?

- Sloj gasa koji je “relevantan” za nastanak spektra koji mi vidimo
- Šta znači relevantan? **(5 min diskusija)**
- U principu, možemo da rešimo problem formiranja spektra uzimajući u obzir celu zvezdu – to je ipak, vrlo nepraktično
- **Donja granica:** dovoljno duboko da nijedan foton neće stići direktno do nas
- **Gornja granica:** dovoljno visoko da će svaki foton stići direktno do nas

“Fotonu treba xyz  
godina da pobegne iz  
centra Sunca, i zašto  
ja ne volim tu priču”



# Još par pitanja

- U procesu apsorpcije u spektralnoj liniji, foton treba da ima određenu energiju da bi ekscitovao atom.
- Kako se “potrefi” da foton ima baš tačno potrebnu energiju / frekvenciju?



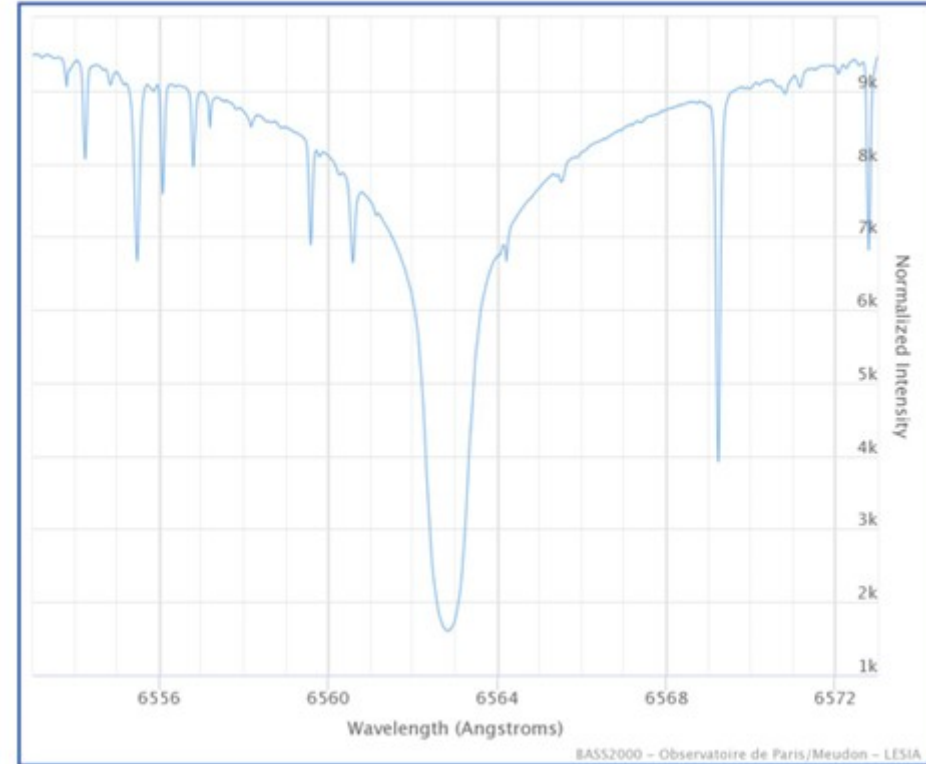
$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1$$

# Odgovor

- U procesu apsorpcije u spektralnoj liniji, foton treba da ima određenu energiju da bi ekscitovao atom.
- Kako se “potrefi” da foton ima baš tačno potrebnu energiju / frekvenciju?
- **Ne postoji pojam kao što je “tačno određena energija” (ili bilo koja talasna dužina)**
- Usled Heisenberg-ovog principa, energije nivoa su “razmazane”.
- Povrh toga, imamo Doplerovsko širenje usled haotičnog kretanja čestica, i tzv. sudarno širenje koje dodatno “širi” nivoe, pa i liniju

# Pitanje:

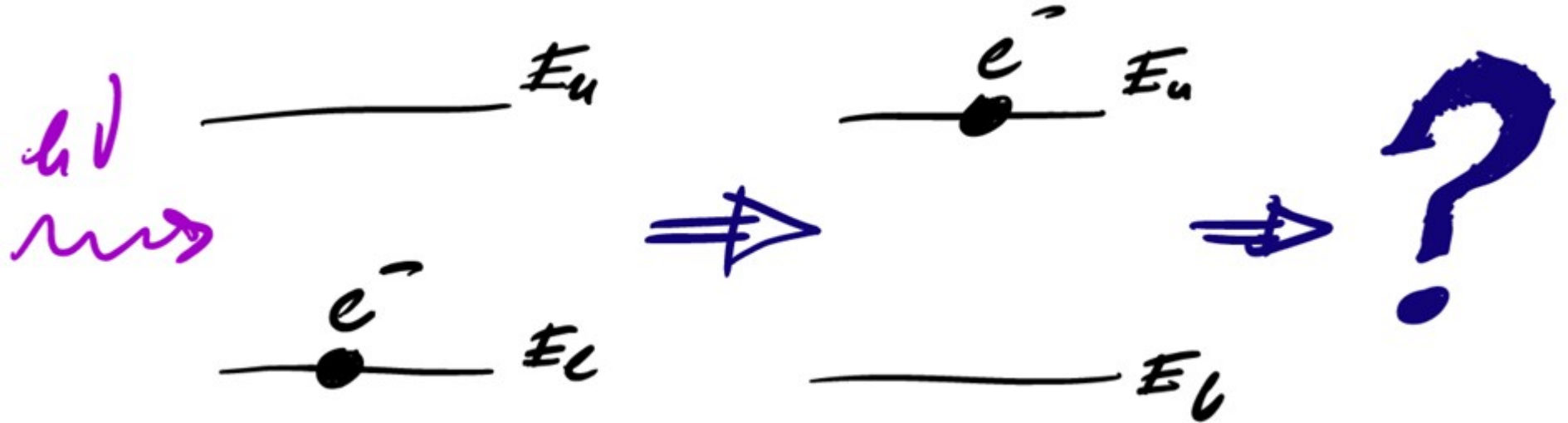
- Verovali ili ne, ne postoje “apsorpcioni” ili “emisioni” spektri
- Spektar je rezultat procesa apsorpcije i emisije od njihovog odnosa zavisi da li će linija biti “apsorpciona” ili “emisiona”
- Npr. ako bi nekim čudom zvezda bila u termalnoj ravnoteži, prelazi u linijama bi na kraju ipak dali spektar apsolutno crnog tela!





# Pitanje:

- Šta se dešava sa atomom nakon što ga foton ekscituje?



# Odgovor

- Svi želimo da kažemo da atom biva de-eskcitovan i da emituje foton
- Čak iako nema drugih relevantnih nivoa za “kaskadne” prelaze, atom može da se de-ekscituje **sudarno**, i u stvari se većina atoma tako i de-ekscituje u fotosferama zvezda
- Ovo znači da je foton zaista **nestao; energija mu je pretvorena u termalnu energiju gasa**
- Ovaj proces će biti jako važan da shvatimo šta je **lokalna** termodinamička ravnoteža (LTR)

## Za kraj uvodnog dela:

- Svi materijali su na:

[https://github.com/ivanzmilic/TZS\\_matf](https://github.com/ivanzmilic/TZS_matf)

- “Page view” na: [https://ivanzmilic.github.io/TZS\\_matf/](https://ivanzmilic.github.io/TZS_matf/)

- Možete mi pisati na:

ivanzmilic @ gmail.com

# A sad na nešto ozbiljnije (ako stignemo)

- Relevantne fizičke (fotometrijske) veličine za opis polja zračenja!
- Tabla + Vežbe u petak!