

Teorija Zvezdanih Spektara

Lekcija 4: Koeficijent apsorpcije

Ivan Milić (AOB / MATF)

25/10/2022

Podsetnik

- Sada znamo da rešimo jednačinu prenosa ako su nam dati skala optičkih dubina i funkcija izvora.
- Formalno rešenje duž pravca:

$$I_{\lambda}^{+} = I_{\lambda}^{0}e^{-\tau_{\lambda}} + \int_0^{\tau_{\lambda}} S(t)e^{-t}dt$$

- Ukoliko želimo intenzitet u zavisnosti od dubine ili pravca, menjamo granice i dodajemo $1/\mu$ gde je potrebno!
- Za funkciju izvora često možemo da pretpostavimo LTR, tj. Plankovu funkciju (**2-3 min šta to beše znači**)
- A kako naći skalnu optičkih dubina? Moramo da znamo neprozračnost! Današnji čas je o tome :)

Ali pre toga pitanje

- Smislite bar jedan primer prenosa zračenja gde funkcija izvora **nije** Plankova funkcija (tj. gde nismo u LTR!) - **3 min.**

Primer ne-LTR funkcije izvora

- U **našem formalizmu** atmosfera Zemlje emituje vidljivu svetlost, kroz procese rasejanja.
- Funkcija izvora na ovim talasnim dužinama je u potpunosti određena rasejanom svetlošću Sunca.
- Zašto je nebo plavo? (Atmosfera Zemlje je optički tanka).

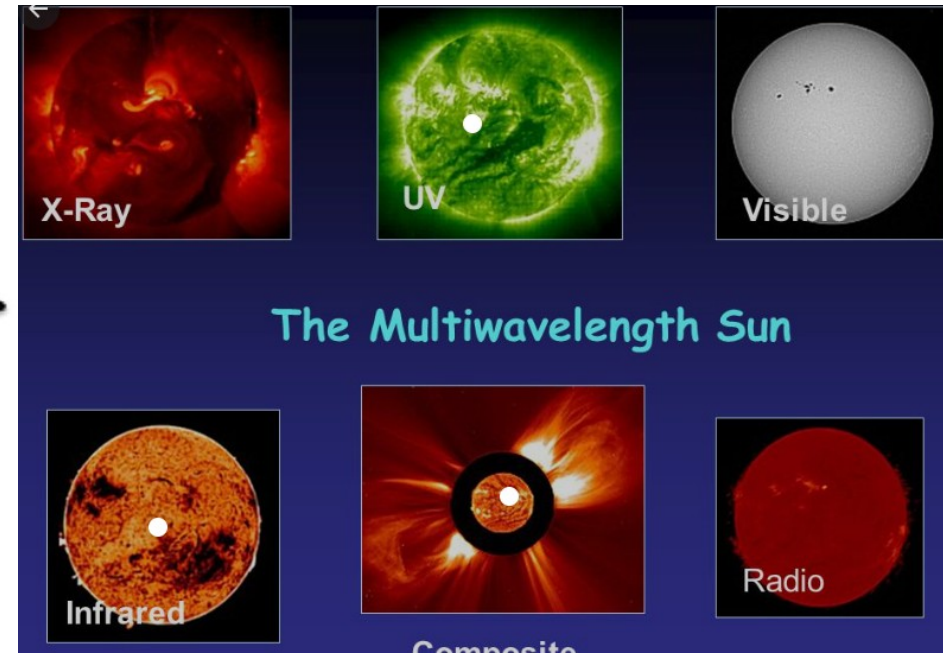
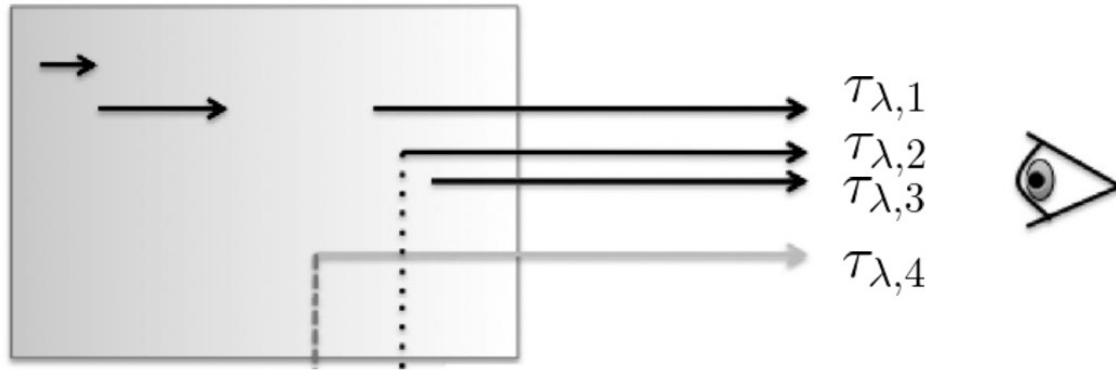


Obratite pažnju

- Rekli smo: **u našem formalizmu!**
- U koeficijent apsorpcije ulaze i prava apsorpcija (termalizacija fotona) i rasejanje. Bitno nam je samo da su fotoni uklonjeni iz zraka
- U koeficijent emisije ulaze i termalna emisija i emisija usled rasejanja. Na taj način vraćamo fotone u zrak!
- U svakodnevnom jeziku (pa čak i astronomskom), ako biste rekli da Zemljina atmosfera zrači na vidljivim talasnim dužinama, došlo bi do nesporazuma :)
- **Za sada**, pretpostavimo da je funkcija izvora jednaka Plankovoj funkciji.
- Ostaje nam da izračunamo koeficijent apsorpcije (tj. neprozračnost)

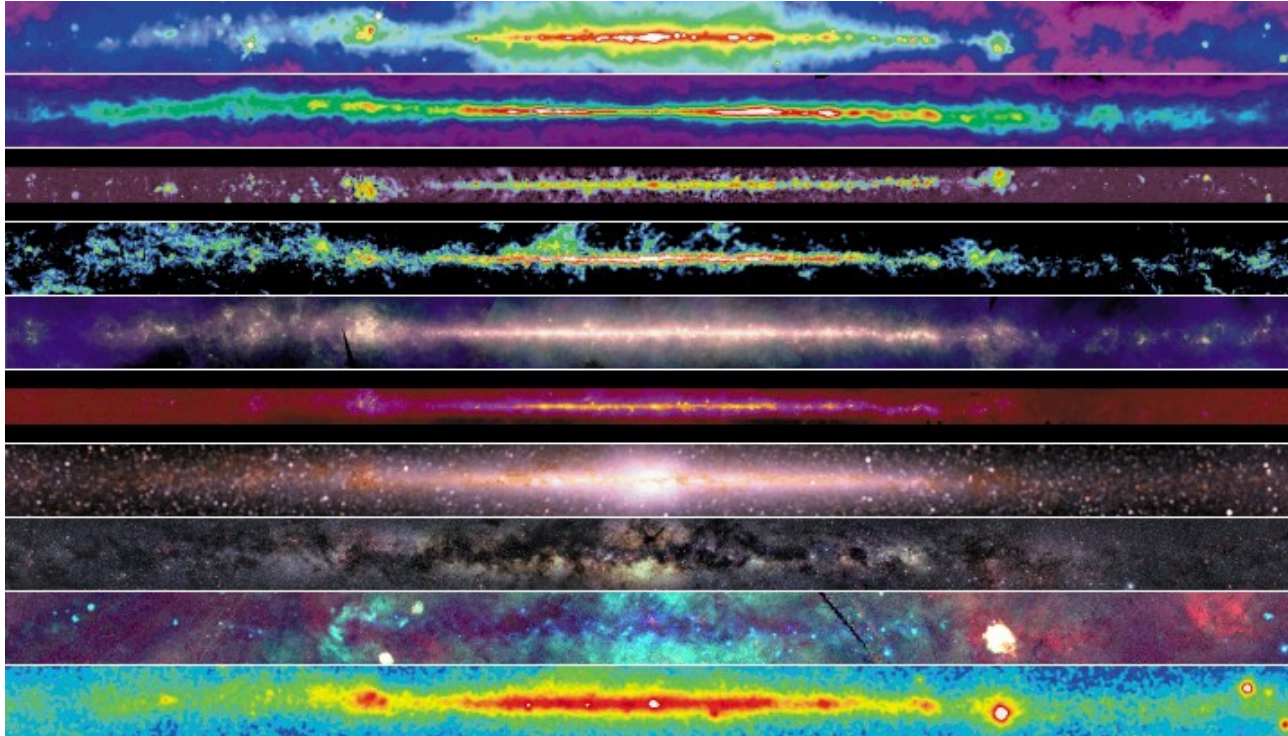
Neprozračnost zavisi od talasne dužine!

- To je blago kontraintuitivno, pošto su primeri za tu neprozračnost u našem svakodnevnom životu jako suptilni (plavo nebo je jedan primer).
- U zvezdanim atmosferama, fotoni različitih talasnih dužina dopiru sa različitih dubina.
- Na različitim talasnim dužinama “vidimo” različite funkcije izvora!



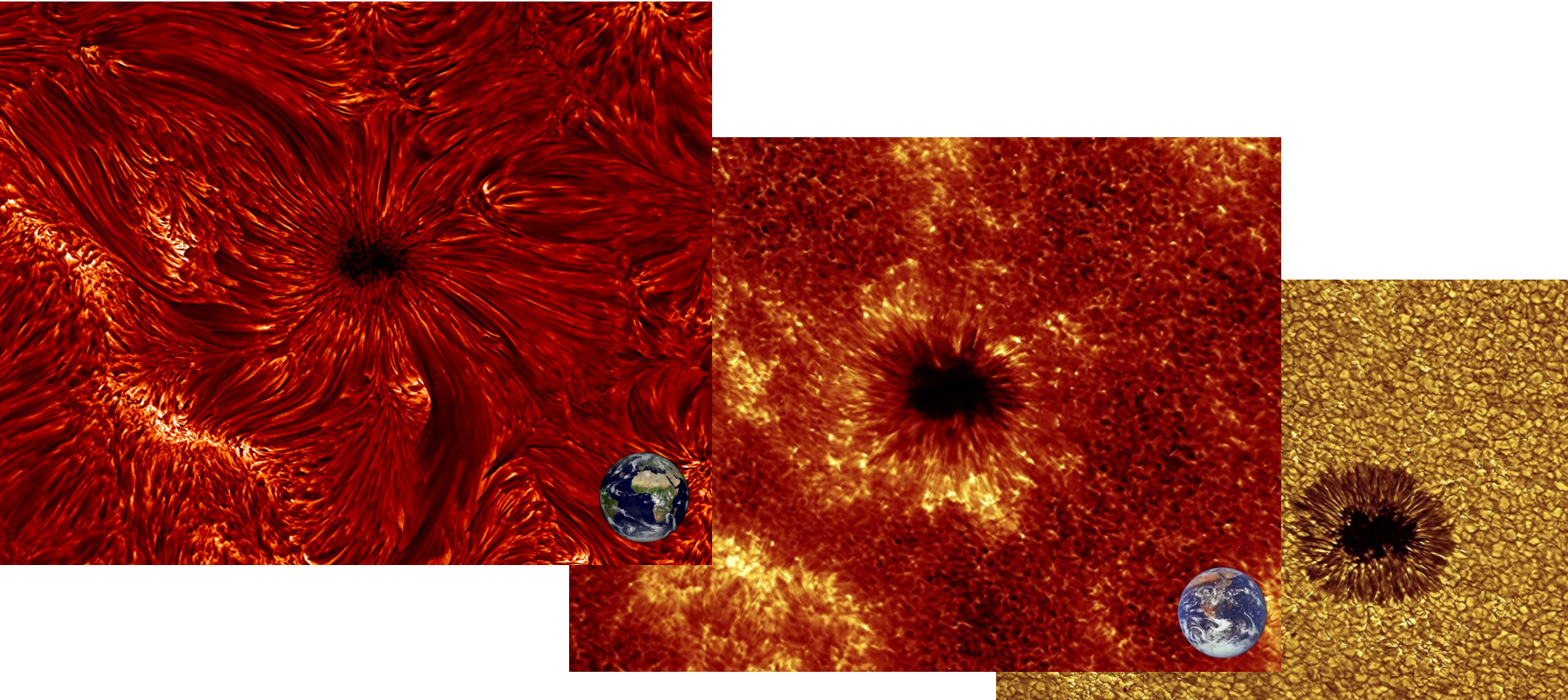
Neprozračnost zavisi od talasne dužine

- Razlog za ovu zavisnost je to što na različitim talasnim dužinama dominiraju različiti procesi (npr. rasejanje je jače na kraćim talasnim dužinama, itd...)
- Posledica je da nebeska tela izgledaju drugačije kada ih gledamo na različitim talasnim dužinama



Suptilniji primer

- Sunce posmatrano na 656.3 nm (H alpha), 396.8 nm (Ca II H) i 405 nm (G band)

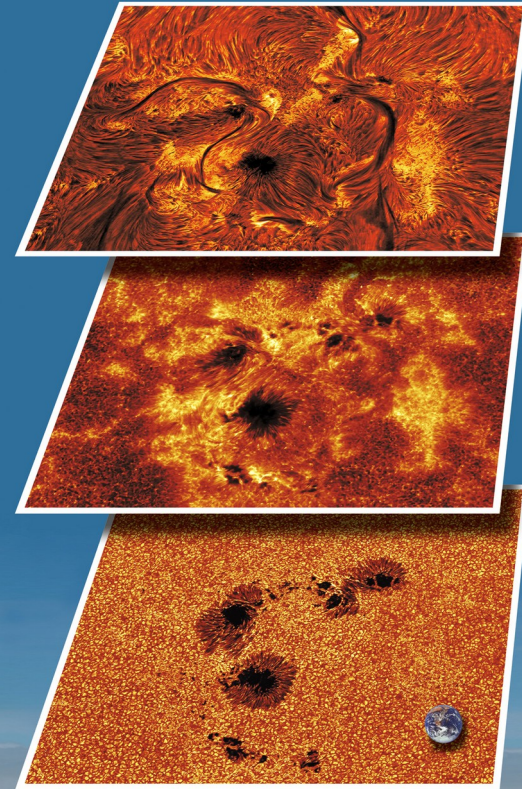


“Visina formiranja”

- Setimo se (vežbe) da:

$$I_{\lambda}^{+} \approx S_{\lambda}(\tau_{\lambda} = 1)$$

- Optička dubina jedan leži na različitim fizičkim visinama za različite talasne dužine
- Te visine odgovaraju različitim temperaturama
- Na ovoj slici, svaki piksel ima drugačiju temperaturnu strukturu, pa na različitim talasnim dužinama vidimo različite “slike”
- Ovakve slike možemo dobiti fokusirajući se čak i na samo jednu liniju!



THE SUN from photosphere to chromosphere

Three images of a solar active region taken on June 8, 2005 with the Dutch Open Telescope on La Palma (Canary Islands). The Earth inset shows the scale. The coloring is artificial.

The bottom image (G band, 430.5 nm) shows the solar photosphere where the sunshine escapes. The active region contains large, cool, highly magnetic sunspots. It is surrounded everywhere by small convection cells (granulation). Tiny bright dots between the granules mark small-scale but intense magnetism. The areas with enhanced magnetism are much brighter in the middle image (Ca II H, 396.8 nm) which samples the overlying low chromosphere, 500 km higher up. The top image (H α , 656.3 nm) shows the upper chromosphere, about 2000 km above the photosphere. In this height magnetism dominates all motions of the solar gas so that the long, slender fibrils and dark filaments outline the intricate arrangement of solar magnetism. The convective motions at the bottom impose disruptive changes on this arrangement, frequently leading to explosive outbursts of which some hit the Earth's environment.



Malo formalnije

- Uvedimo neku “referentnu” skalu optičke dubine, definisanu na nekoj dogovorenoj talasnoj dužini:

$$\tau(z) = \int_{z_{\max}}^z -\chi_0(z) dz$$

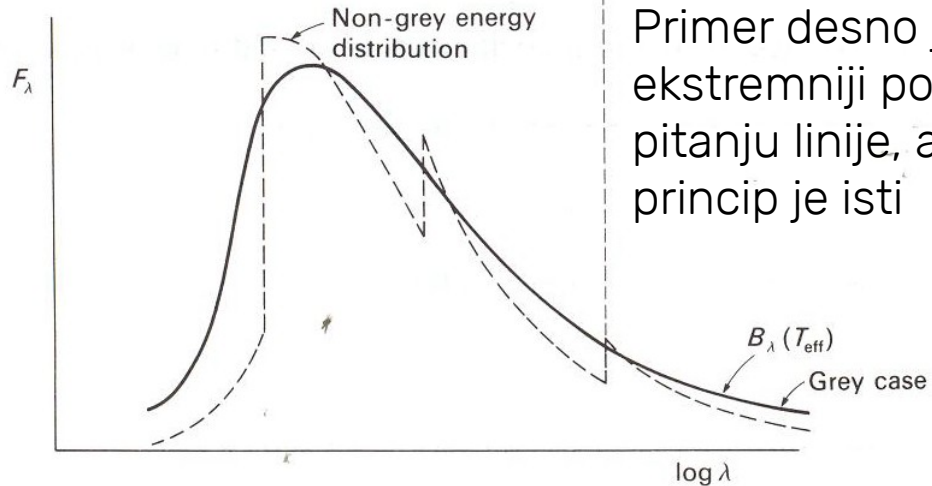
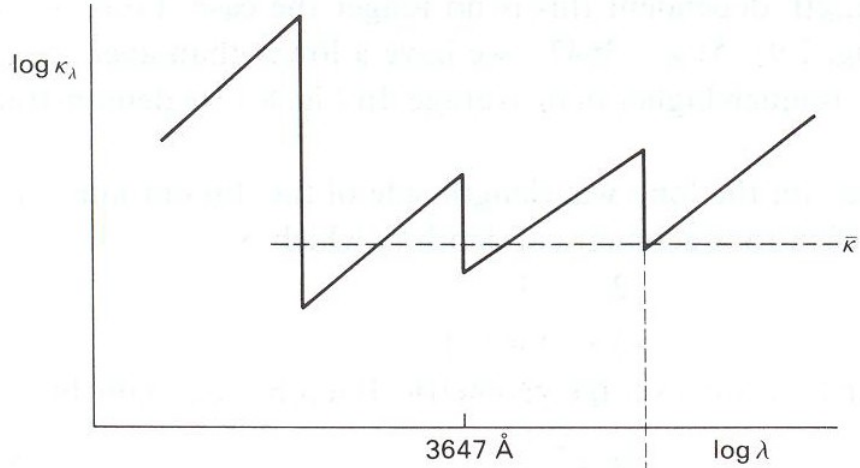
- Uvedimo odnos izmedju neprozračnosti na nekoj talasnoj dužini i referentne neprozračnosti:

$$r_\lambda = \frac{\chi_\lambda}{\chi_0}$$

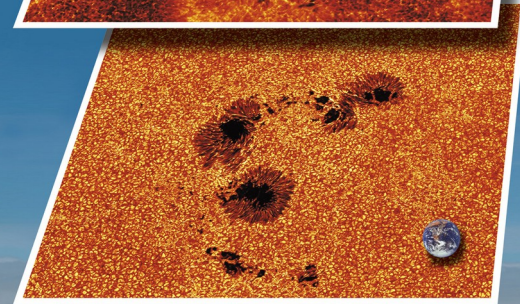
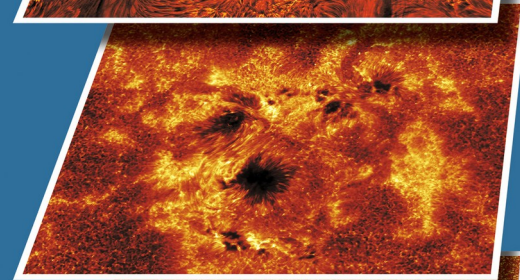
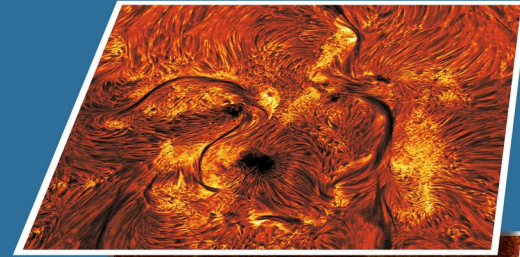
- Ukoliko pretpostavimo da je funkcija izvora linearna na skali referentne optičke dubine dobijamo:

$$\begin{aligned} S &= a + b\tau \\ I_\lambda^+ &= a + \frac{b}{r_\lambda} \end{aligned}$$

Uticaj zavisnosti koeficijenta apsorpcije od talasne dužine na izgled spektra



Primer desno je malo ekstremniji pošto su u pitanju linije, ali princip je isti



THE SUN from photosphere to chromosphere

Three images of a solar active region taken on June 8, 2005 with the Dutch Open Telescope on La Palma (Canary Islands). The Earth inset shows the scale. The bottom image (G band, 430.5 nm) shows the solar photosphere where the sunspots escape. The active region contains large, cool, highly magnetic sunspots. It is surrounded everywhere by small convection cells (granulation). Tiny bright dots between the granules mark small-scale but intense magnetism. The areas with enhanced magnetism are much brighter in the middle image (Ca II H, 850 nm) which samples the overlying low chromosphere, 500 km higher up. The top image (H α , 656.3 nm) shows the upper chromosphere, about 2000 km above the photosphere. In this height magnetism dominates all motions of the solar gas so that the long, slender fibrils and dark filaments outline the intricate arrangement of solar magnetism. The convective motions at the bottom impose disruptive changes on this arrangement, frequently leading to explosive outbursts of which some hit the Earth's environment.

<http://dot.astro.uu.nl>

Šta sve doprinosi apsorpciji na nekoj talasnoj dužini

- Zapišite sve procese kojih se setite koji dovode do apsorpcije (prava apsorpcija i rasejanje)
- 3 min

Šta sve doprinosi apsorpciji na nekoj talasnoj dužini

- Zapišite sve procese kojih se setite koji dovode do apsorpcije (prava apsorpcija i rasejanje)
- Apсорpcija u spektralnim linijama (vezano-vezani prelazi, **b-b**).
- Fotojonizacija (vezano – slobodni prelazi, **b-f**).
- 3-body procesi (slobodno – slobodni prelazi, **f-f**)
- Disocijacija molekula
- Rasejanje na slobodnim elektronima
- Rasejanje na atomima i molekulima (Rejljevo rasejanje)
- Rasejanje na česticama prašine
- Ovo su samo najčešći / najvažniji procesi u vidljivom / UV / IR delu spektra!

Slobodno-vezani prelazi u atomu vodonika

H je dominantan apsorber u kontinuumu kod zvezda klase B, A i F.

Ukupna energija elektrona na orbiti n:

$$E_n = -\frac{Ze^2}{2r_n} < 0$$

$$mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{r_n^2}$$

$$E_n = -\frac{C}{n^2}$$

$$E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_\infty = 0.$$

$$\chi_n = E_n - E_1 = C\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) > 0$$

$$\chi_n = \chi_\infty \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$\chi_1 = 0$$

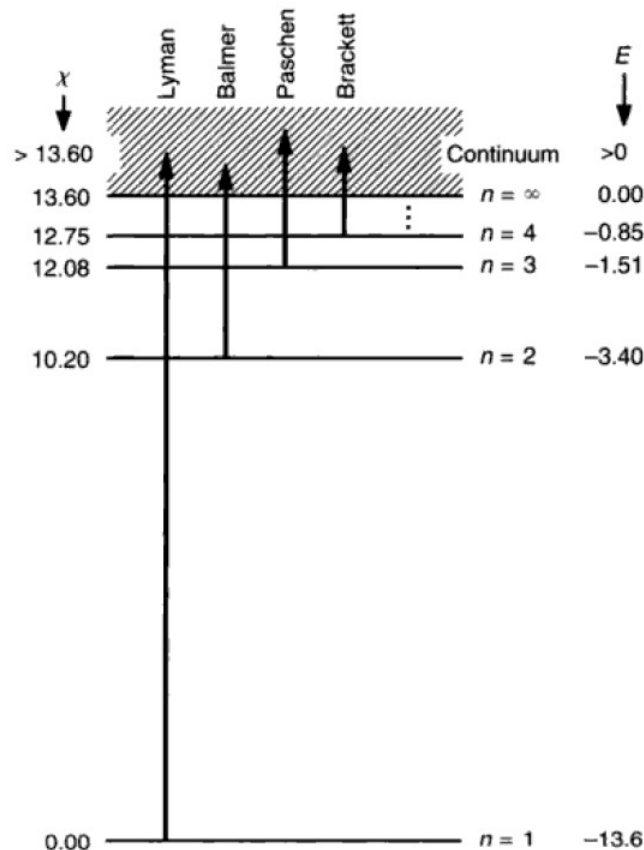
$$\chi_\infty = C = -E_1 = 13.6 \text{ eV}$$

Granice serija

Seriya	n	$\lambda_g [\text{nm}]$
Lyman	1	91.2
Balmer	2	364.6
Paschen	3	820.4
Brackett	4	1459.0
Pfund	5	2279.0

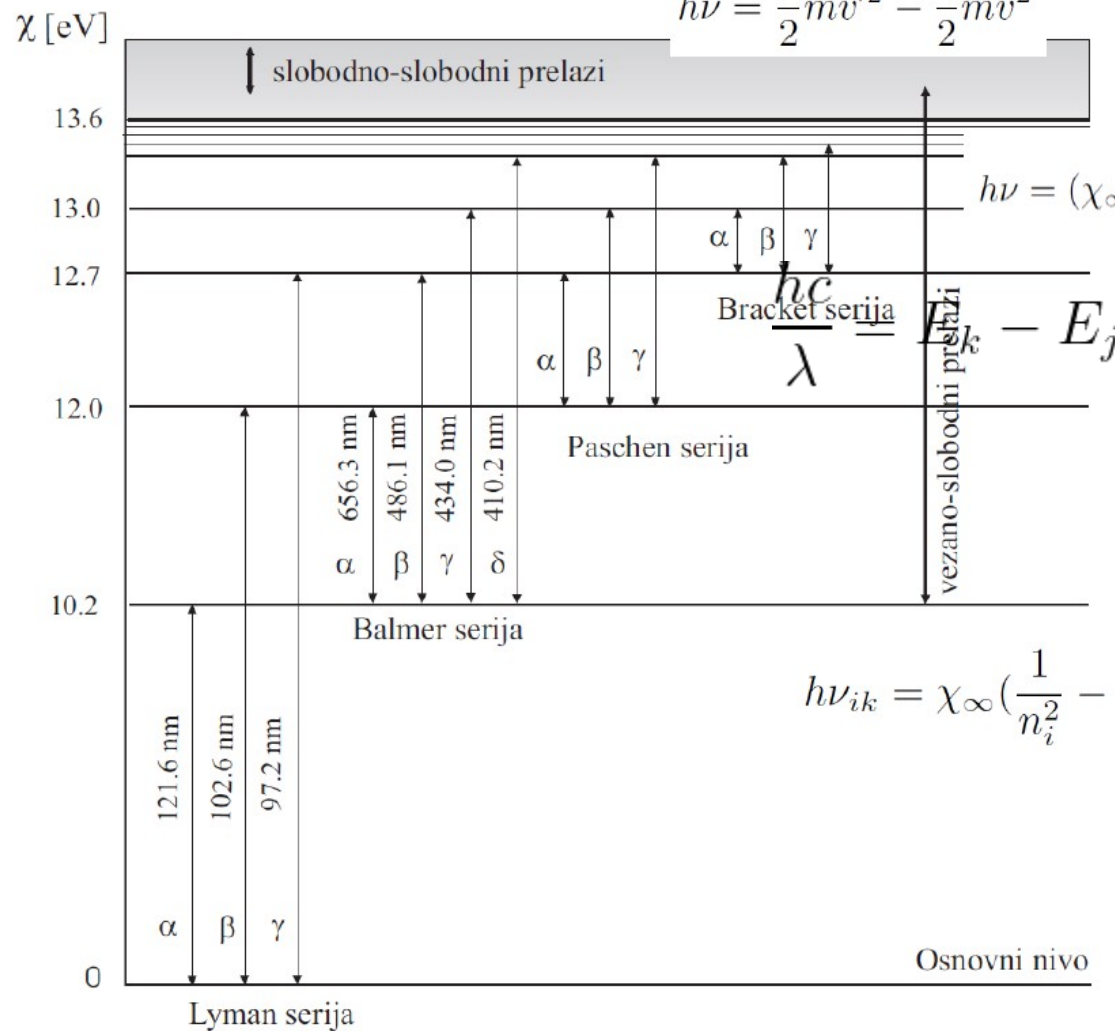
$$h\nu_g = \chi_\infty - \chi_n = \chi_\infty - \chi_\infty \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = \chi_\infty \frac{1}{n^2}$$

$$\nu_g = \frac{\chi_\infty}{h} \frac{1}{n^2}$$



$$\frac{hc}{\lambda} = E_k - E_j \quad E_n = E_0 \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$h\nu = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}mv^2$$



slobodno-slobodni (f-f)

vezano-slobodni (b-f)

kontinuum

vezano-vezani (b-b)

linije

$$\frac{hc}{\lambda_{ik}} = E_0 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2}\right)$$

Zavisnost koeficijenta apsorpcije kod b-f prelaza od talasne dužine

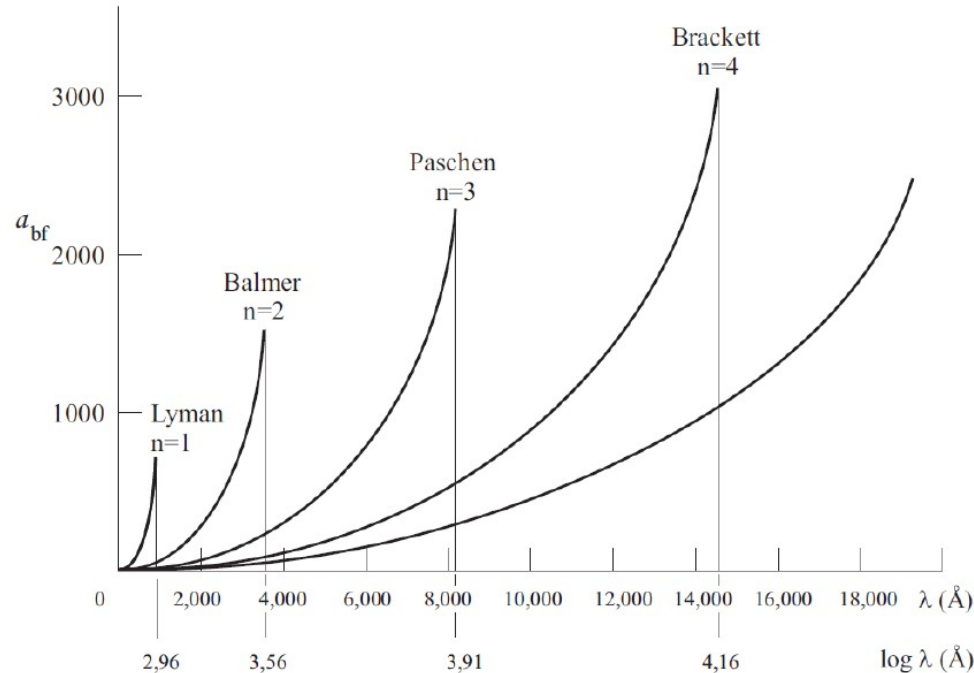
$$k_{\nu}^{b-f} = C g_{bf} \frac{1}{\nu^3 n^5}, (\nu \geq \nu_g)$$

Kramers (1923) modifikovao Gaunt (1930)

$$k_{\nu_g}^{b-f} \propto n$$

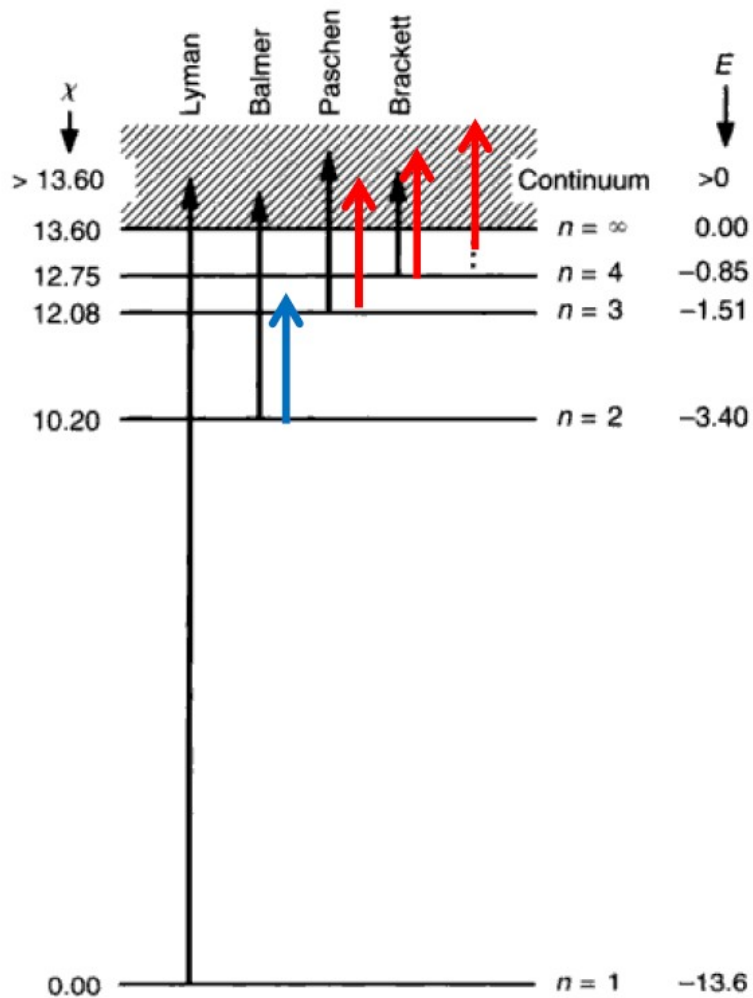
$$k_{\nu}^{b-f} \cdot n_n = C \frac{g_{bf}}{\nu^3 n^5} \frac{n_1}{g_1} g_n e^{-\chi_n/kT}$$

$$\chi_{\nu}^{b-f} = \sum_{n=n_g}^{\infty} k_{\nu}^{b-f} n_n = C' \frac{n_1}{g_1} \frac{1}{\nu^3} \sum_{n=n_g}^{\infty} \frac{g_n}{n^5} g_{bf} e^{-\frac{\chi_n}{kT}}$$

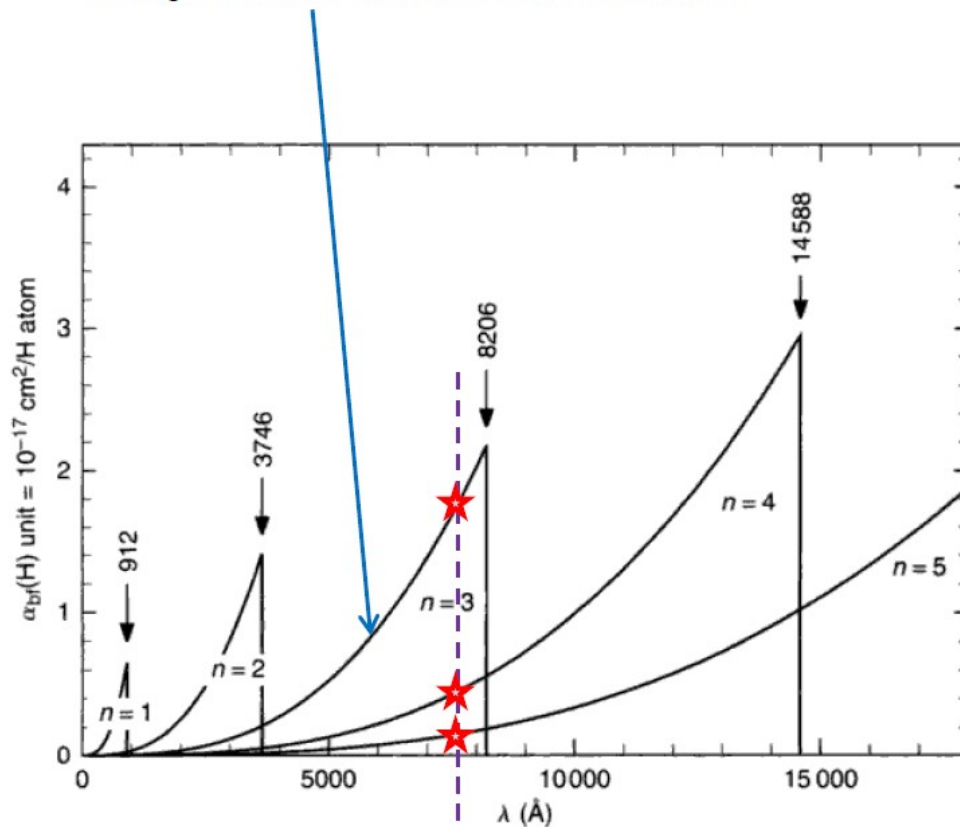


$$\chi_{\nu}^{b-f} = f(n_e, n^+, T, \nu)$$

Na jednoj talasnoj dužini imamo doprinos, u principu, više od jednog b-f prelaza!



U vidljivom delu spektra posmatramo Pašenov kontinuum, jer najveći doprinos daju prelazi sa trećeg nivoa atoma vodonika u kontinuum



$$\chi_{\nu}^{b-f} = \sum_{n=n_g}^{\infty} k_{\nu}^{b-f} n_n$$

Slobodno – slobodni prelazi

Zakočno zračenje bi bila emisija fotona pri prolasku elektrona pored pozitivnog jona. Postoji i obrnuti proces! (Inverzni bremsstrahlung!)

Apsorpcija fotona ide na povećanje kinetičke energije elektrona

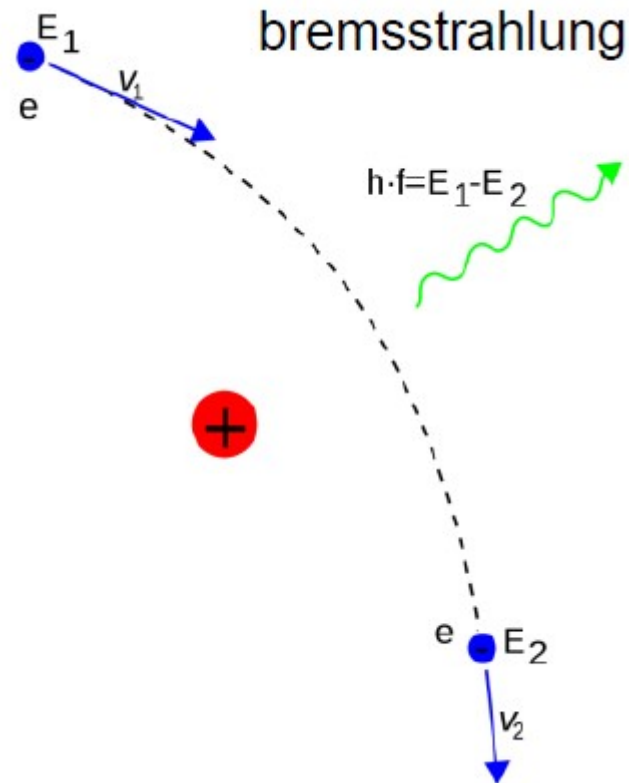
$$h\nu = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}mv^2$$

Kramers:

$$dk_{\nu}^{f-f} = C'' Z_{ef}^2 g_{ff} \frac{1}{v} \frac{1}{\nu^3} dv \quad (v, v + dv)$$

$$k_{\nu}^{f-f} = C'' g_{ff} \frac{Z'^2}{\nu^3} \int \frac{1}{v} f(v) dv = C^* \frac{1}{\nu^3} \frac{1}{\sqrt{T}} g_{ff}$$

$$\chi_{\nu}^{f-f} = C^* \frac{n_e n^+}{\sqrt{T}} g_{ff} \frac{1}{\nu^3} = f(n_e, n^+, T, \nu)$$



Negativan jon vodonika

- Neprozračnost hladnijih zvezda ne može da se opiše procesima o kojima smo do sada pričali (**zašto? 2-3 min**)
- Wildt (1939) je pokazao da je H^- najznačajniji izvor neprozračnosti u Sunčevoj atmosferi
- Energija veze je svega 0.75eV, sve preko toga "jonizuje" ovaj jon nazad u $H + \text{elektron}$
vezano-slobodni prelazi

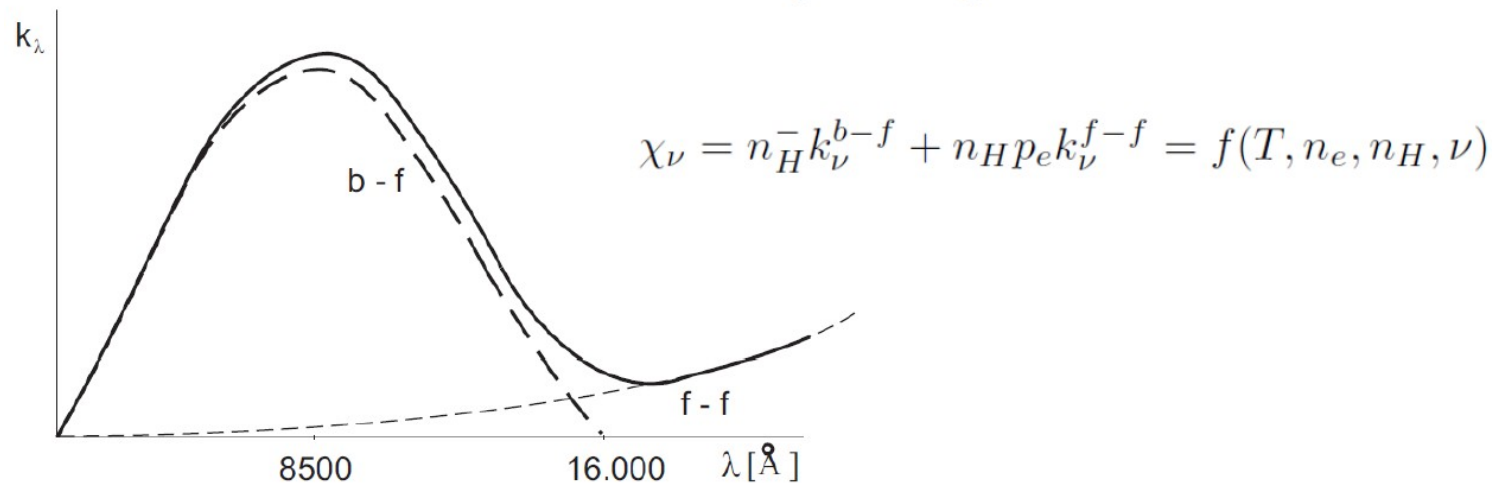
$$H^- + h\nu = H + e(v)$$

$$h\nu = 0.75\text{eV} + \frac{1}{2}mv^2$$

slobodno - slobodni prelazi

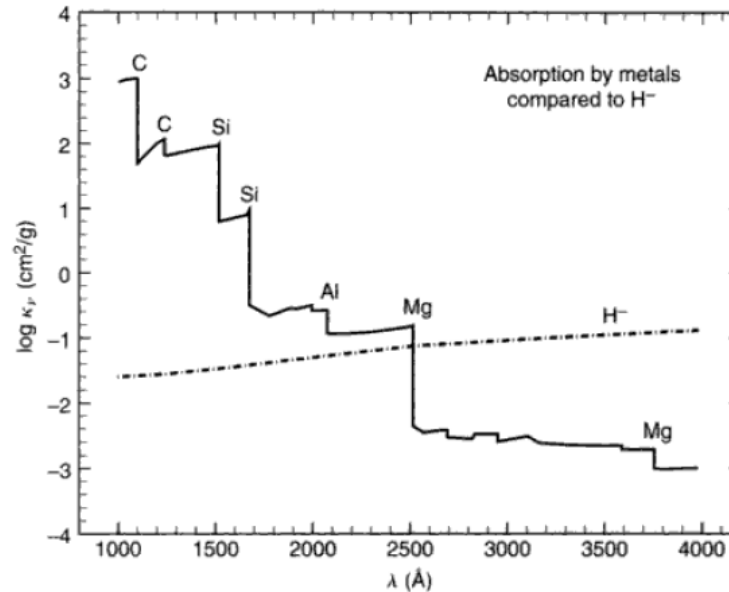
$$H + e(v) + h\nu = H + e(v')$$

$$h\nu = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}mv^2$$

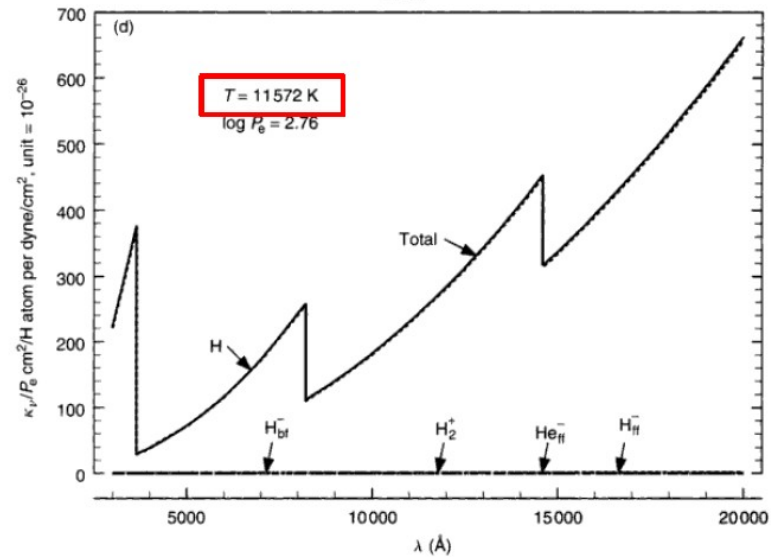
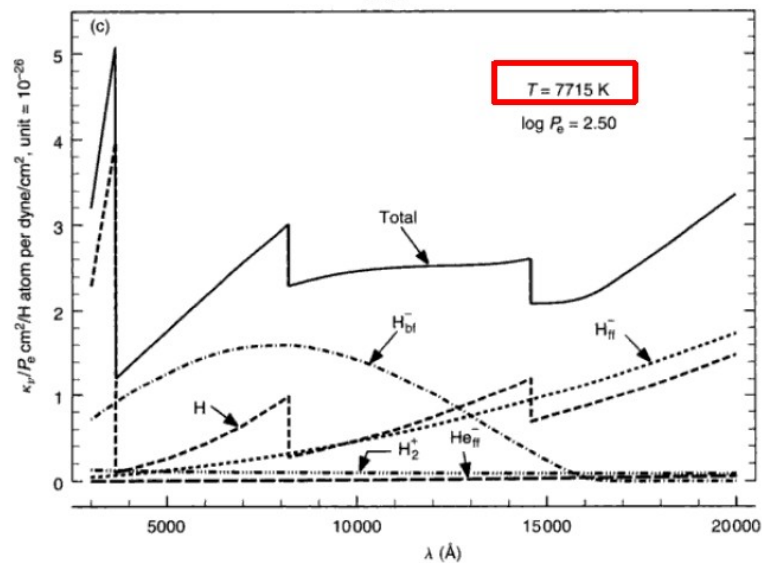
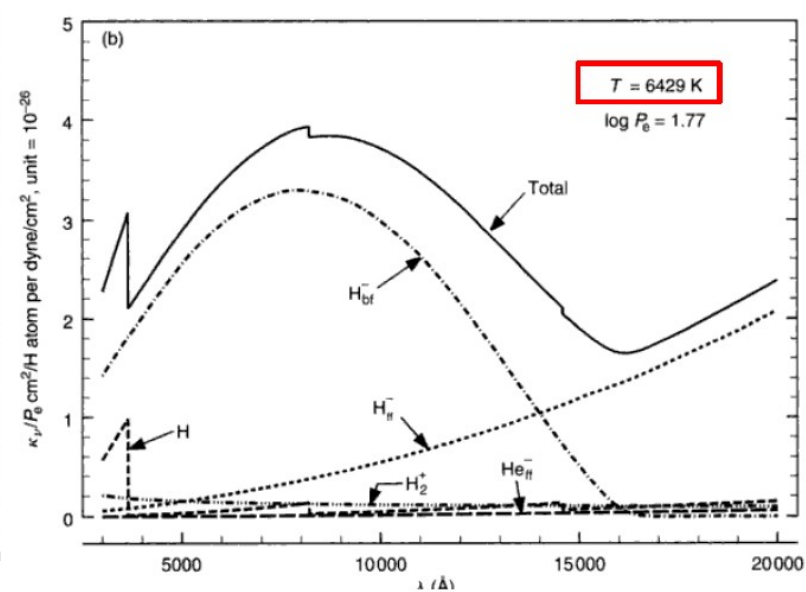
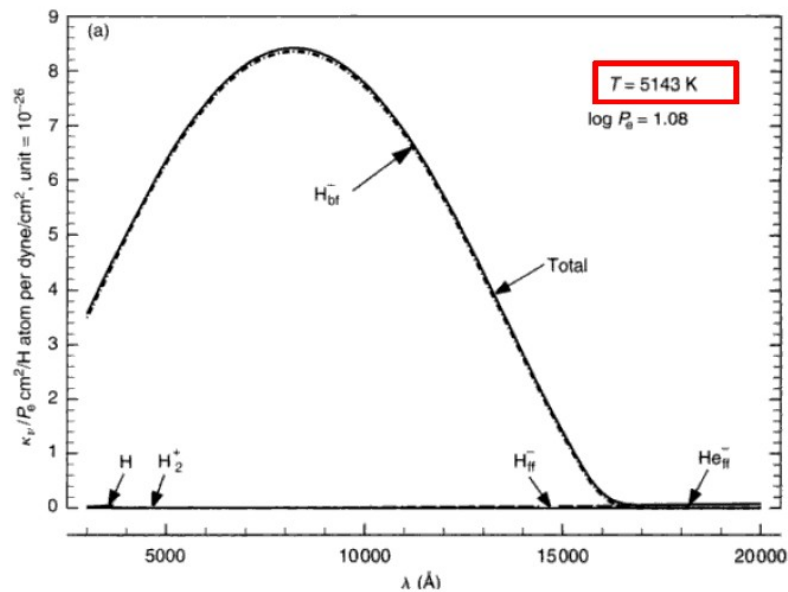


Ostali apsorberi

- H_2^+ jon (kod vrlo hladnih M zvezda)
- He (zbog velike energije jonizacije samo kod O i ranih B zvezda)
- Rasejanje na slobodnim elektronima (kod O i ranih B zvezda)
- Rejljevo rasejanje na molekulima (kod hladnih zvezda)
- C, Si, Al, Mg, Fe značajni apsorberi (b-f) u UV za $\lambda < 250$ nm
- Molekuli CN^- , C_2^- , H_2O^- , TiO, CrH, FeH, MgH (kod hladnih zvezda)

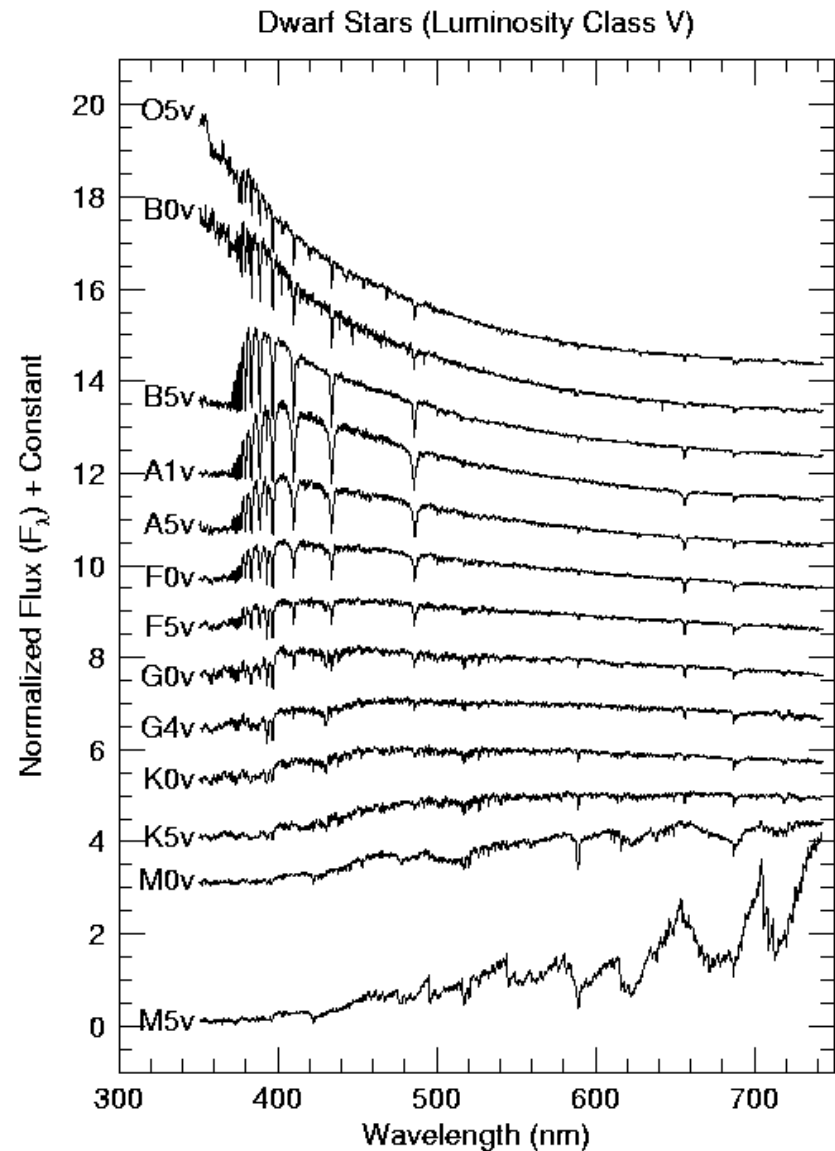
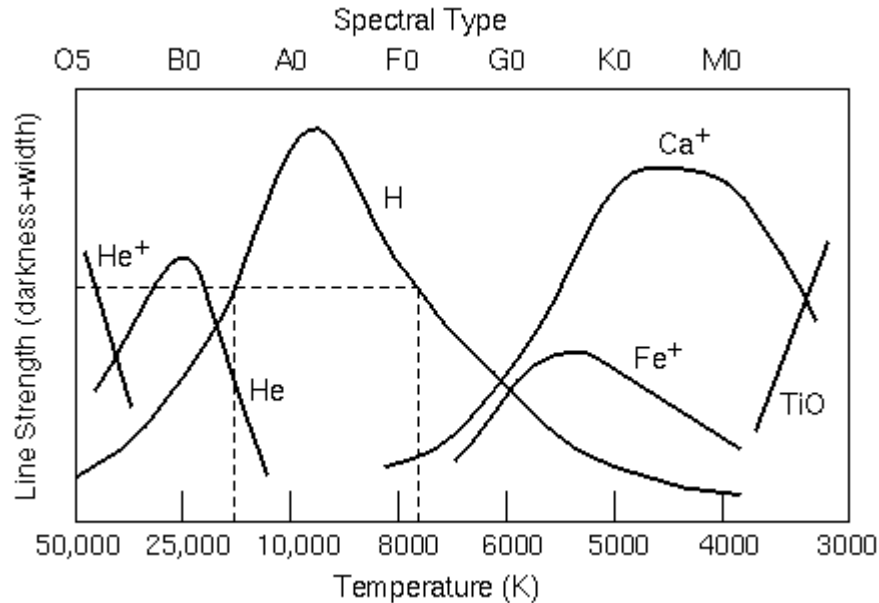


$$\kappa_{\text{total}} = \{[\kappa(H_{\text{bf}}) + \kappa(H_{\text{ff}}) + \kappa(H_{\text{bf}}^-) + \kappa(H_2^+)](1 - 10^{-\chi_\lambda \theta}) + \kappa(H_{\text{ff}}^-) + \dots\} \\ \times \frac{1}{1 + \Phi(H)/P_e} + \kappa(\text{metals}) + \kappa(\text{He}_{\text{ff}}^-) + \kappa(e) + \dots \quad (8.18)$$



Sve ovo zajedno nam daje mogućnost da opišemo...

- Spektar zvezda različitih spektralnih klasa!
- Ne zaboravite da je osnova svega u Sahinoj (i Boltzmannovoj) raspodeli!



Ako je ostalo vremena, idemo nazad u notebook! :)