

Brzinska polja u zvezdanim fotosferama

Interpretacija astronomskih spektara – Seminarski rad

Nikolina Milanović

27. 12. 2018.

Kretanje fotosferskog gasa

- Fotosfera više nije statična. → Doplerov efekat koji oblikuje profile linija.
 - U kretanje gasa spada i rotacija zvezde, koju odvajamo od “ostalog” kretanja gasa (*turbulencije*) i posebno razmatramo.
- Osuđeni smo na posmatranje **spektra celokupnog diska zvezde**, osim pri posmatranju Sunca.
 - Brzinska polja na Suncu potiču pretežno od granulacije i neradijalnih oscilacija.
- **Cilj:** Iz profila linije zaključiti o prirodi brzinskih polja. Odvojiti uticaj rotacije i zaključiti o geometriji kretanja fotosferskog gasa.
 - Da li se radi o talasima, konvektivnom kretanju, protuberancama i slično.

Turbulencija

- Postojanje supertermalnog širenja linija.
 - Rosseland (1928) naziva kretanje koje ga uzrokuje *turbulencijom*.
 - Dva aproksimativna načina modelovanja turbulencije u spektrima zvezda:
 - **Mikroturbulencija**
 - Kada su dimenzije turbulentnih elemenata male u poređenju sa srednjom slobodnom putanjom fotona.
 - Foton pri kretanju ka posmatraču prolazi kroz mnogo turbulentnih elemenata.
 - **Makroturbulencija**
 - Kada su dimenzije turbulentnih elemenata velike u poređenju sa srednjom slobodnom putanjom fotona.
 - Foton pri kretanju ka posmatraču prolazi kroz jedan turbulentni element.
 - Oba ova metoda razmatraju samo kinematiku, ne i dinamiku u atmosferi (promenu pritiska, temperature), koja se uključuje komplikovanijim hidrodinamičkim modelima.

Neki primeri

- Kako prepoznamo turbulentno proširene linije?
 - Širenje je **proporcionalno talasnoj dužini**.
→ Doplerov efekat.
 - Širine su i do nekoliko stotina km/s.
→ Prevelike za lokalna fotosferska kretanja.
 - Linije su **šire, ali i pliće**. → Ekvivalentna širina se ne menja, linija ne postaje “jača”.
 - Nekada se javljaju **asimetrično proširene linije**. → Granulacija.
- Koje linije su zgodne za ispitivanje turbulencije?
 - Linije koje **nisu blendirane** i koje su inače **uske** (nisu intrinzično proširene, kao što npr. linije H I kod toplih, odnosno linije Ca II K i H kod hladnih zvezda jesu proširene).

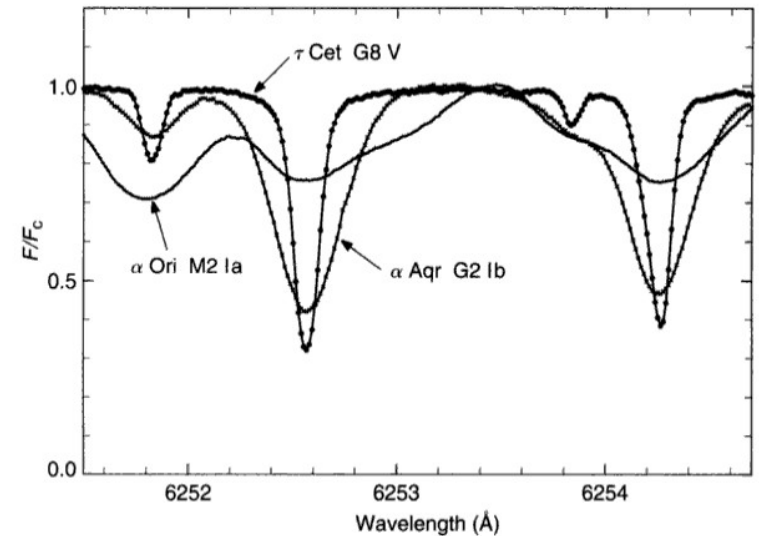


Fig. 17.2. Non-thermal broadening increases with luminosity. Notice how the lines of the supergiant α Aqr are wider but less deep than those of the dwarf τ Cet. These two stars are at roughly the same temperature. α Ori is considerably cooler, resulting in different line strengths, but illustrates the extreme blurring of spectral lines by macroturbulence, as in Eq. (17.8). Data from the Elginfield Observatory, University of Western Ontario.

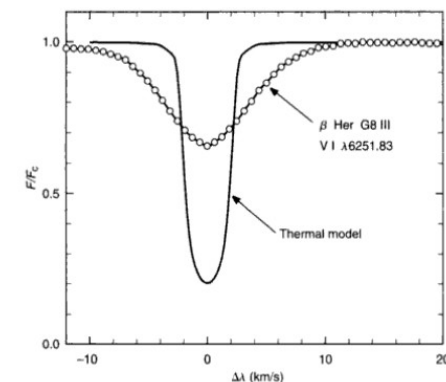


Fig. 17.1. The thermal profile computed from a model photosphere with only thermal broadening does not look much like the real star. Data from the Elginfield Observatory, University of Western Ontario.

Brzinska polja na Suncu

- **Granulacija**

- Oko 10^6 granula na Sunčevom disku, sa srednjim dimenzijama od ~ 1300 km.
- Granule toplije za ~ 100 K od intergranularnog regiona. $\rightarrow \sim 25\%$ sjajnije.
- Brzine uzlaznih tokova plazme su $\sim 1-2$ km/s (sa širom disperzijom).
- Brzine silaznih tokova plazme su ~ 2 puta veće.
 - Tačno je da intergranularni regioni prekrivaju manju površinu i plazma brže ponire zbog zakona održanja mase koja protiče.
 - Ali pre svega, u intergranularnim regionima je koeficijent apsorpcije manji i vidimo dublje konvektivne regione koji se brže kreću.
- Izaziva asimetričnost u profilima linija.
- Kretanje plazme u granulama utiče na lokalno magnetno polje.

- **Neradijalne (petominutne) oscilacije**

- Rezonantni zvučni talasi.
- Manje proširuju linije od granulacije (~ 300 m/s).

Kako modelujemo turbulenciju

- Dok nam hidrodinamički model daje kako su linije proširene i kakvo je kretanje u pozadini toga, model mikro-makro turbulencije na određeni način **postulira** kretanje plazme i **fokusira se na proširenje linija**.
 - Fitujemo nekoliko **slobodnih parametara modela**.
- Tehnički:
 - Pretpostavimo da je kretanje plazme radialno sa Gausovom raspodelom turbulentnih elemenata (količine materije) po brzinama, sa širinom v_0 :

$$N(v)dv = \frac{1}{\pi^{1/2} v_0} e^{-(v/v_0)^2} dv$$

- Brzina koju vidimo zavisice od ugla ϑ , pa projektujemo brzine na pravac vizure:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{c} v \cos\theta; \quad \beta = \frac{\lambda}{c} v_0 \cos\theta \equiv \beta_0 \cos\theta$$

- Izrazimo sve preko pomeraja u talasnoj dužini, pri čemu su pomeraji u talasnoj dužini dati u km/s (korisno pri razmatranju više spektralnih linija):

$$\Delta v/c = \Delta\lambda/\lambda$$

$$N(\Delta\lambda)d\Delta\lambda = \frac{1}{\pi^{1/2}\beta} e^{-(\Delta\lambda/\beta)^2} d\Delta\lambda = \frac{1}{\pi^{1/2}\beta_0 \cos\theta} e^{-[\Delta\lambda/(\beta_0 \cos\theta)]^2} d\Delta\lambda$$

Kako modelujemo turbulenciju

• Mikroturbulencija

- Foton pri kretanju ka posmatraču prolazi kroz mnogo turbulentnih elemenata. Zato pri razmatranju prenosa zračenja mikroturbulentnu brzinu vidimo na isti način kao termalnu brzinu, a opisujemo je tako što je na određeni način uvrstimo u koeficijent apsorpcije.

- Koeficijent apsorpcije (odnosno sam profil linije) proširen mikroturbulencijom:

$$\alpha = \alpha' * N(\Delta\lambda)$$

- Mikroturbulentne brzine su male (~2 km/s), pa je praktično nemoguće izmeriti oblik $N(\Delta\lambda)$. U praksi se uzima izotropna Gausova raspodela (širine ξ , koja se često naziva mikroturbulencijom):

$$N(v)dv = \frac{1}{\pi^{1/2}\xi} e^{-(v/\xi)^2} dv$$

* ξ je slobodan parametar modela

- Konvolucija gausijana iz termalnog širenja sadržanog u α i gausijana iz mikroturbulencije daje novi gausijan sa širinom:

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{2kT}{m} + \xi^2 \right)^{1/2}$$

- Ukoliko je linija slaba (nije saturisana), povećanje ξ dovodi do širenja linije, pri čemu ona postaje plića, a ekvivalentna širina se ne menja. Ukoliko je linija saturisane, povećanje ξ dovodi do povećanja opsega λ na kome dolazi do apsorpcije, smanjuje saturaciju i time povećava ukupnu apsorpciju (ekvivalentnu širinu).

Kako modelujemo turbulenciju

• Makroturbulencija

- Foton pri kretanju ka posmatraču prolazi kroz jedan turbulentni element. Zato makroturbulencija ne utiče na sam prenos zračenja. Ipak vidimo širenje, a ne pomeranje linija, zato što posmatramo fluks celokupnog diska zvezde (vidimo veliki broj turbulentnih elemenata).
- Primer: Posmatranje Sunca kroz slit-spektrograf.

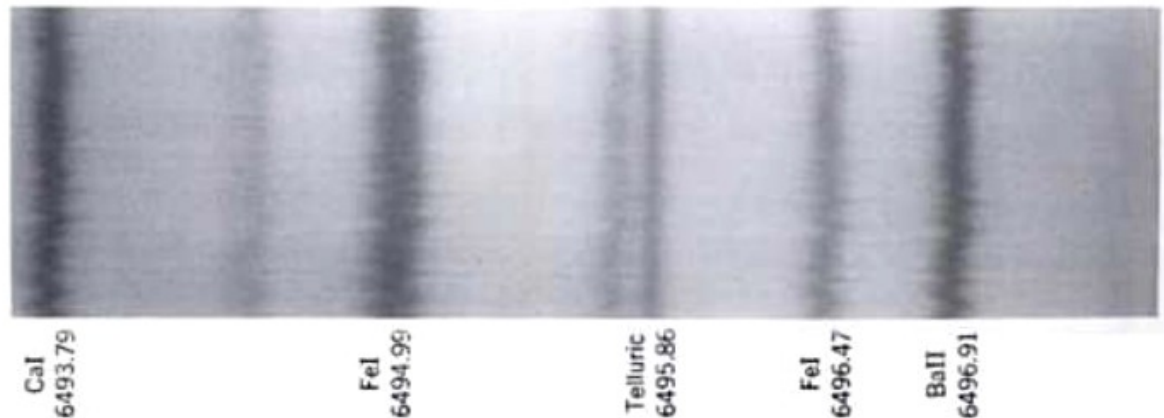


Fig. 17.4. Solar spectra show the individual Doppler shifts of convective cells according to the position of the cells along the entrance slit of the spectrograph. Notice the telluric line that has no wiggles. Photograph courtesy of the McMath-Hulbert Observatory.

Kako modelujemo turbulenciju

- **Makroturbulencija**

- Tehnički:

- Zamislimo da je disk zvezde podeljen na makroturbulentne elemente, i da je I_v^0 intenzitet u liniji za neku poziciju na disku, bez uticaja makroturbulencije (a najčešće sa obračunatom mikroturbulencijom).
 - Sa uticajem makroturbulencije intenzitet u liniji je I_v :

$$I_v = I_v^0 * \Theta(\Delta\lambda)$$

- Ovde Θ predstavlja procenat fotona u određenom opsegu talasnih dužina, odnosno brzina. Fluks celokupnog diska dobijamo kao:

$$\mathcal{F}_v = \oint I_v^0 * \Theta(\Delta\lambda) \cos \theta \, d\omega$$

Kako modelujemo turbulenciju

• Makroturbulencija

– Modelovanje :

- Ukoliko bi makroturbulencija bila izotropna:

$$\delta_v = \Theta(\Delta\lambda) * \oint I_v^0 \cos \theta \, d\omega = \Theta(\Delta\lambda) * \delta_v^0$$

- Realniji model: **radijalno-tangencijalna makroturbulencija**.

– Zbog izviranja i poniranja plazme definitivno mora postojati i horizontalno kretanje. Uvodimo da se deo materije kreće radijalno (indeksi R), a deo tangencijalno (indeksi T), oba sa posebnim Gausovim raspodelama brzina.

$$\Theta(\Delta\lambda) = A_R \Theta_R(\Delta\lambda) + A_T \Theta_T(\Delta\lambda) = \frac{A_R}{\pi^{1/2} \zeta_R \cos \theta} e^{-(\Delta\lambda/\zeta_R \cos \theta)^2} + \frac{A_T}{\pi^{1/2} \zeta_T \sin \theta} e^{-(\Delta\lambda/\zeta_T \sin \theta)^2}$$

– Ukoliko uzmemo da intenzitet ne zavisi od pozicije na disku, dobija se fluks:

$$\delta_v = \pi I_v * \left[\frac{2A_R \Delta\lambda}{\pi^{1/2} \zeta_R^2} \int_0^{\zeta_R/\Delta\lambda} e^{-1/u^2} du + \frac{2A_T \Delta\lambda}{\pi^{1/2} \zeta_T^2} \int_0^{\zeta_T/\Delta\lambda} e^{-1/u^2} du \right] \equiv \pi I_v * M(\Delta\lambda)$$

* A_R , A_T , ζ_R i ζ_T bi bili slobodni parametri modela

Kako modelujemo turbulenciju

• Makroturbulencija

- $M(\Delta\lambda)$ – funkcija makro-širenja.
- Iako su raspodele po komponentama bile Gausove, sama linija na kraju nema Gausov profil.
- Kako u razmatranje nisu bile uključene različite temperature plazme koja izvire i plazme koja ponire, funkcija $M(\Delta\lambda)$ je simetrična u odnosu na centar linije.
- Za detaljniju analizu treba uključiti rotaciju i limb-darkening...

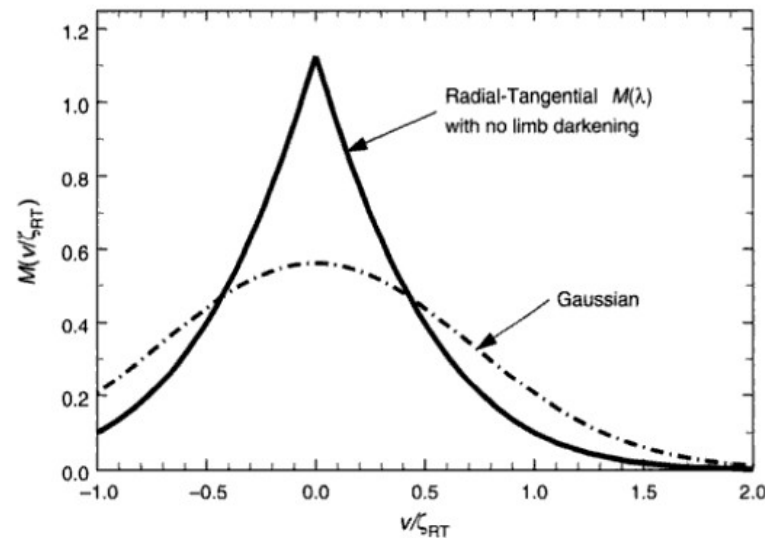


Fig. 17.5. Disk integration produces the cuspy shape of the radial-tangential Doppler-shift distribution. The implicit Gaussian distribution is shown for comparison.

Turbulencija na HR dijagramu

- Makroturbulencija raste sa povećanjem temperature i povećanjem luminoznosti
- Za mikroturbulenciju rezultati* nagoveštavaju da raste sa povećanjem luminoznosti
 - * Rezultati dolaze iz krive rasta (koja i sama ima dosta parametara koje treba odrediti) ili iz Furijeove analize profila linija (gde je neophodno precizno zadati raspodelu temperature).
- Parametri zavise od dubine:
 - Mikroturbulentna brzina raste sa povećanjem dubine, a brzina vezana za oscilacije opada.
 - Kakvo ćemo kretanje videti zavisi i od izbora linije, odnosno talasne dužine.

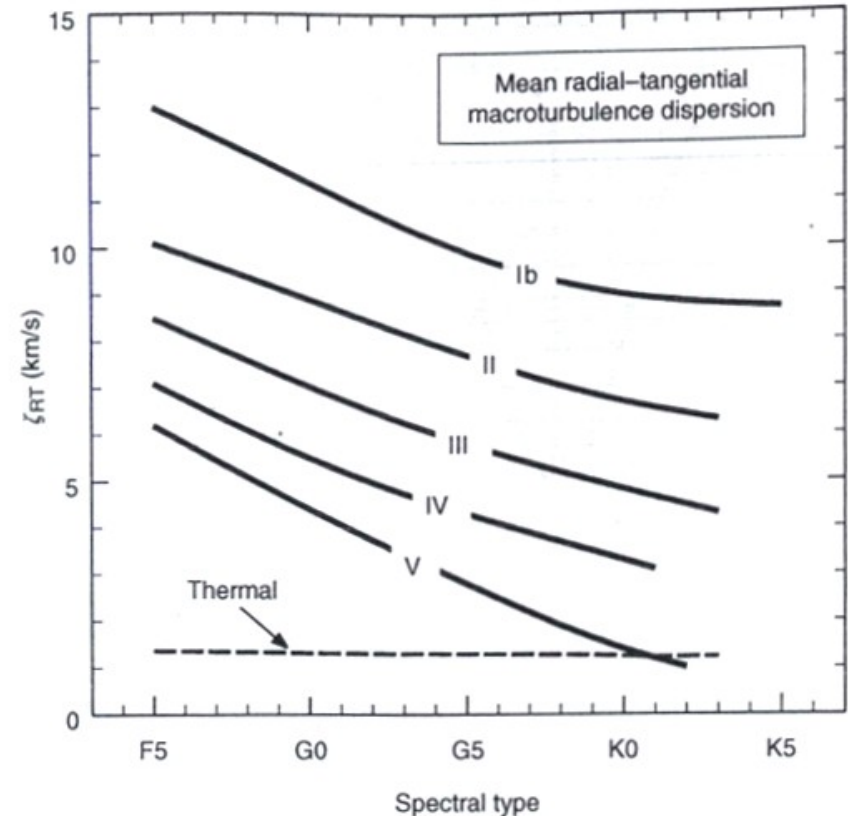


Fig. 17.10. On the cool half of the HR diagram, non-thermal velocities become more vigorous toward higher temperatures and higher luminosities, as shown by these variations in macroturbulence dispersion. The characteristic thermal dispersion is shown for comparison. Only for cool dwarfs does the macroturbulence drop to the level of the thermal broadening.

Asimetrija linija i bisektori

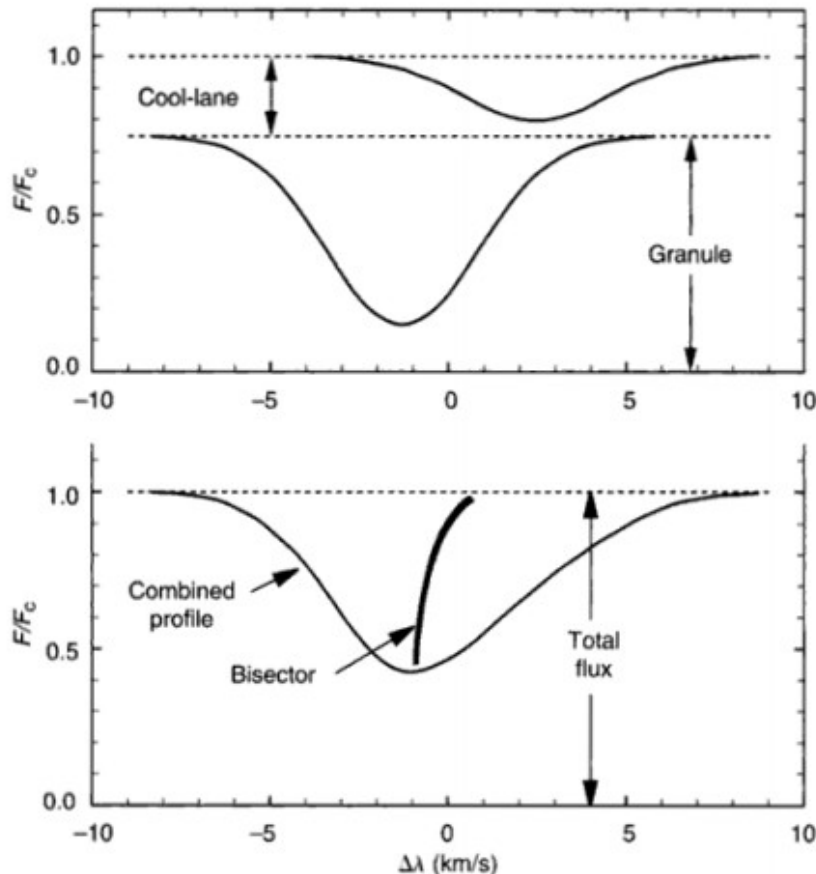


Fig. 17.12. A simple two-stream model helps us visualize how granulation produces asymmetries in lines. At disk center, fall velocities are directed away from us while rise velocities are toward us. The spectrum from the cool falling material alone is shown at the top. Under it is the profile from the hot rising material. At the bottom is the combined profile, i.e., the sum of the two. The net result is a profile that is mostly blue-shifted with a depressed red wing. The bisector shows this quantitatively.

- **Granulacija dovodi do (suptilne) asimetrije linija.**

- Ne kreće se jednak deo plazme ka nama i od nas. Na Sunčevom disku su “zastupljenije” granule od intergranularnog regiona.
- Sistematsko kuplovanje između Doplerovog pomaka i varijacije u sjaju.
- Ovo sistematsko kuplovanje ne postoji kod petominutnih oscilacija, pa one ne doprinose asimetriji, već samo širenju linija.

Asimetrija linija i bisektori

• Bisektor

- Povezuje središta širine profila na različitim fluksevima u liniji.
 - Pomoću njega pratimo asimetriju linije.
- Bisektor oblika slova C:
 - Karakterističan za granulaciju.
 - Gornji deo C: Nastanak se objašnjava slikom na prethodnom slajdu.
 - Donji deo C: Potiče od toga što granulacija (turbulentna brzina) opada sa visinom, pa jezgro linije (koje se formira pliće nego krila) nekada skoro i da nema Doplerov pomak.

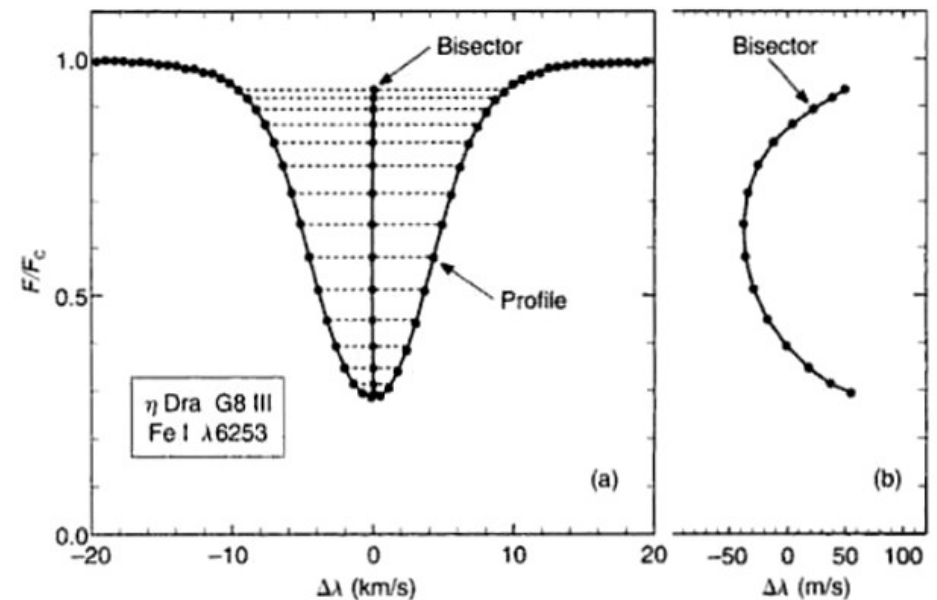


Fig. 17.11. A line profile and its bisector are shown in (a). The bisector is composed of the midpoints of horizontal line segments running horizontally across the line profile (dashed lines). Interpolation is needed on the right-hand side of the spectral line. Although in (a) the bisector appears to be a straight vertical line, (b) shows the same bisector on a wavelength scale that is expanded about 80 times. Now the shape of the bisector is seen to have the classical "C" shape associated with granulation. Data from the Elginfield Observatory, University of Western Ontario.

Asimetrija linija i bisektori

• Sunce

- Možemo da nađemo apsolutne pomeraje linija, korigovane za kretanje Zemlje, odnosno imamo apsolutni bisektor. Možemo da pratimo promenu bisektora duž diska Sunca.
 - Ovo nam je bitno za proveru hidrodinamičkih simulacija.
 - Ukupni bisektor (sa celog diska) je oblika iskrivljenog slova C.

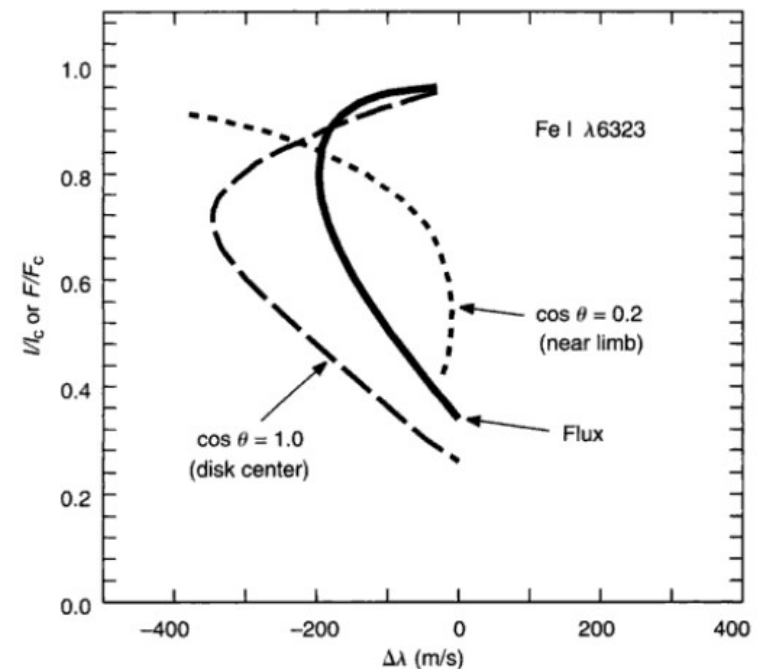


Fig. 17.13. Typical solar lines have flux (disk-integrated) bisectors shaped like a distorted "C." There is a considerable variation with limb distance, arising from a combination of changing depth of formation and geometry of view. The line profiles themselves become shallower and wider toward the limb. Based on Stathopoulou and Alissandrakis (1993).

Hladne zvezde vs. tople zvezde

• Hladne zvezde

- Slično Suncu – bisektori su oblika C, ali nemamo apsolutne pomeraje.
- Možemo da usrednjimo bisektore više linija za bolji odnos S/N.
- Postoje hladne zvezde sa “energičnijom” granulacijom (bisektor pokriva veći opseg pomeraja, donji deo C pomenen ka plavom, granulacija zalazi i u više slojeve atmosfere).

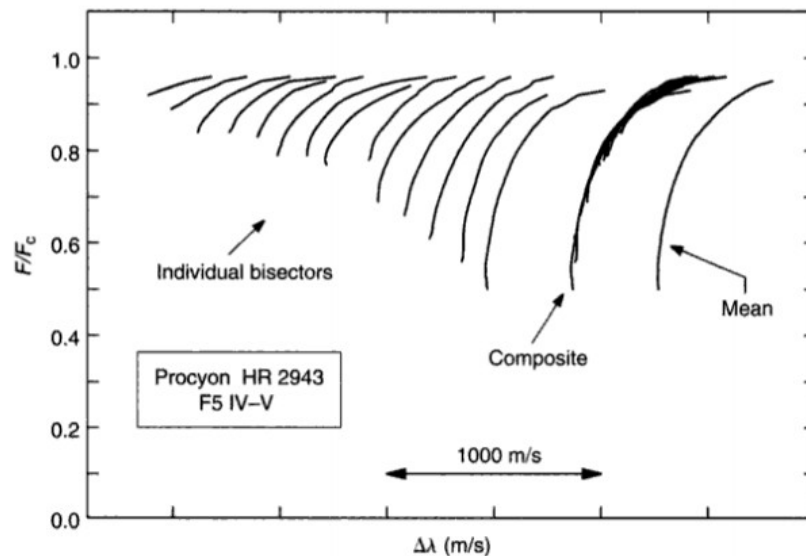


Fig. 17.14. The shapes of individual line bisectors are shown on the left. They are arbitrarily positioned in wavelength and ordered by line depth. Although they do not match exactly, the bisectors of weaker lines generally correspond to the upper portion of the bisectors of stronger lines. This is shown in the composite, which is formed by translating each bisector in wavelength. On the right we see the mean bisector derived from the composite.

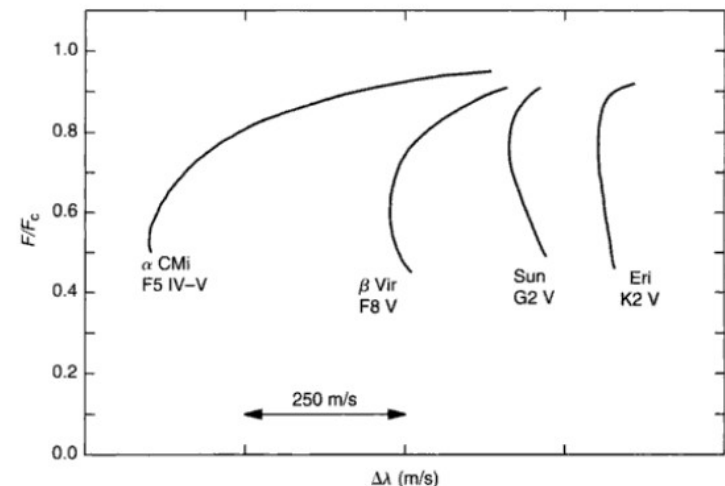


Fig. 17.15. This sample of bisectors illustrates the systematic changes in shape with spectral type on the cool half of the HR diagram. The absolute zero velocity has no meaning in this diagram; the bisectors are arbitrarily shifted to order them by spectral type. The velocity span increases toward hotter and toward more luminous stars (not shown here). Along with the increase in velocity span is a change in curvature. The core portion of the bisector is blue-shifted when the velocity span is large but unshifted when the velocity span is small.

Hladne zvezde vs. tople zvezde

• Tople zvezde

- Turbulentne brzine su veće za red veličine nego kod hladnih zvezda.
- Još uvek nepoznato da li je reč o granularnom kretanju poteklom od tanke konvektivne zone ili o nečemu drugom.
- Bisektor pokriva veći opseg pomeraja i ima obrnut oblik u odnosu na hladne zvezde.
- Ovde ne možemo da usrednjimo bisektore više linija.

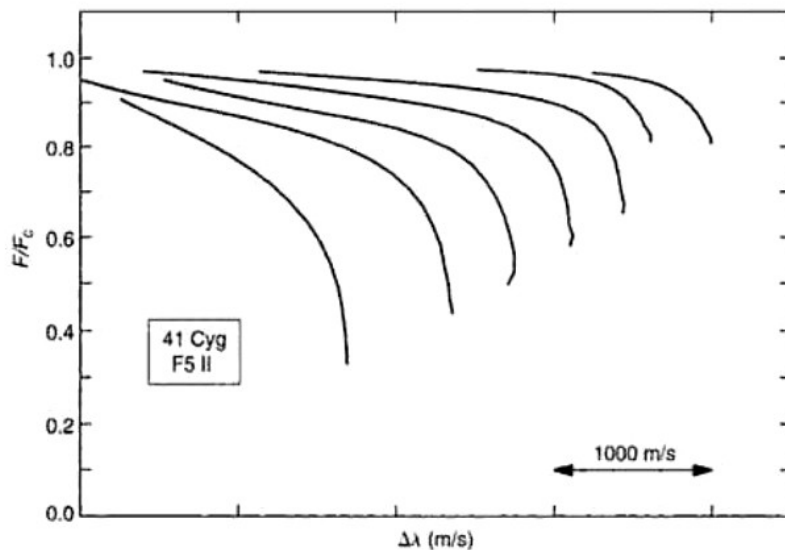


Fig. 17.16. Line bisectors of hotter stars are reversed in curvature. They cannot be brought together as in Fig. 17.14 because the shapes of the bisectors for weak lines do not mimic the top portion of the bisectors of strong lines. Notice the larger velocity span here compared to stars on the cool half of the HR diagram.

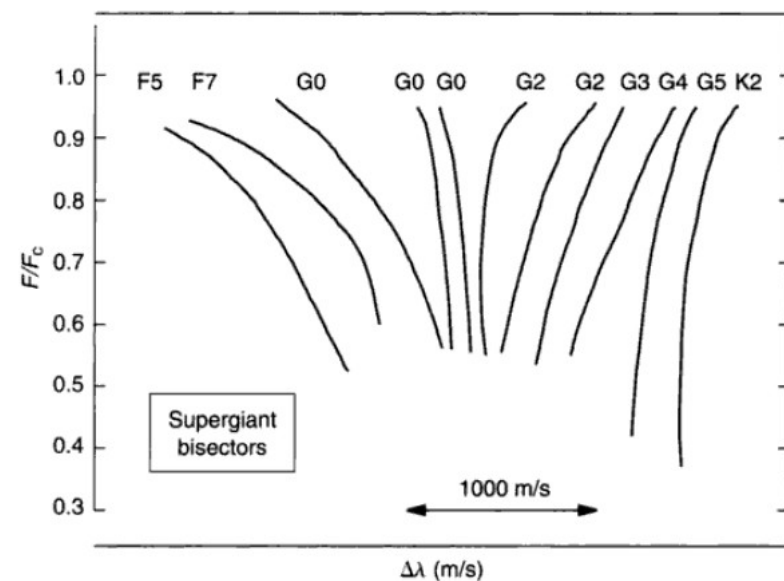


Fig. 17.17. Line bisectors show a continuous but rapid change in curvature and slope across the central region of the HR diagram. These bisectors are for Ib supergiant observations. Based on Gray and Toner (1986).

Hladne zvezde vs. tople zvezde

- **Granica granulacije**

- Na osnovu promene oblika bisektora.

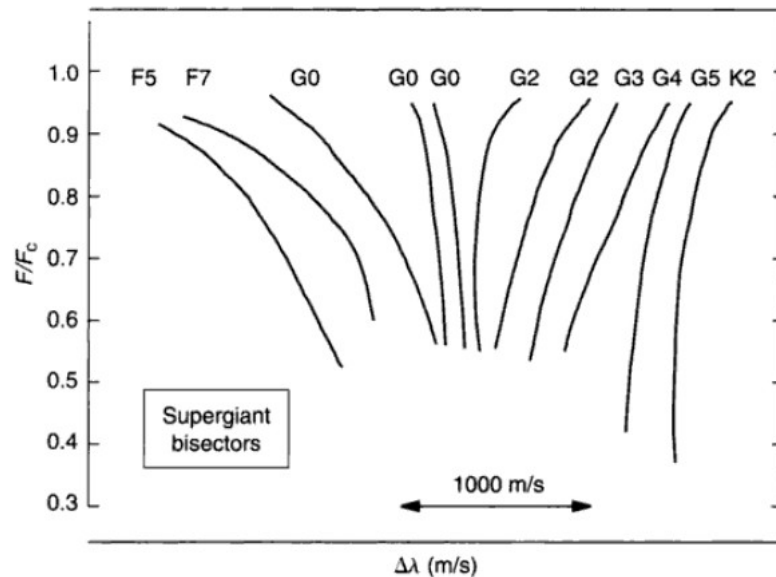


Fig. 17.17. Line bisectors show a continuous but rapid change in curvature and slope across the central region of the HR diagram. These bisectors are for Ib supergiant observations. Based on Gray and Toner (1986).

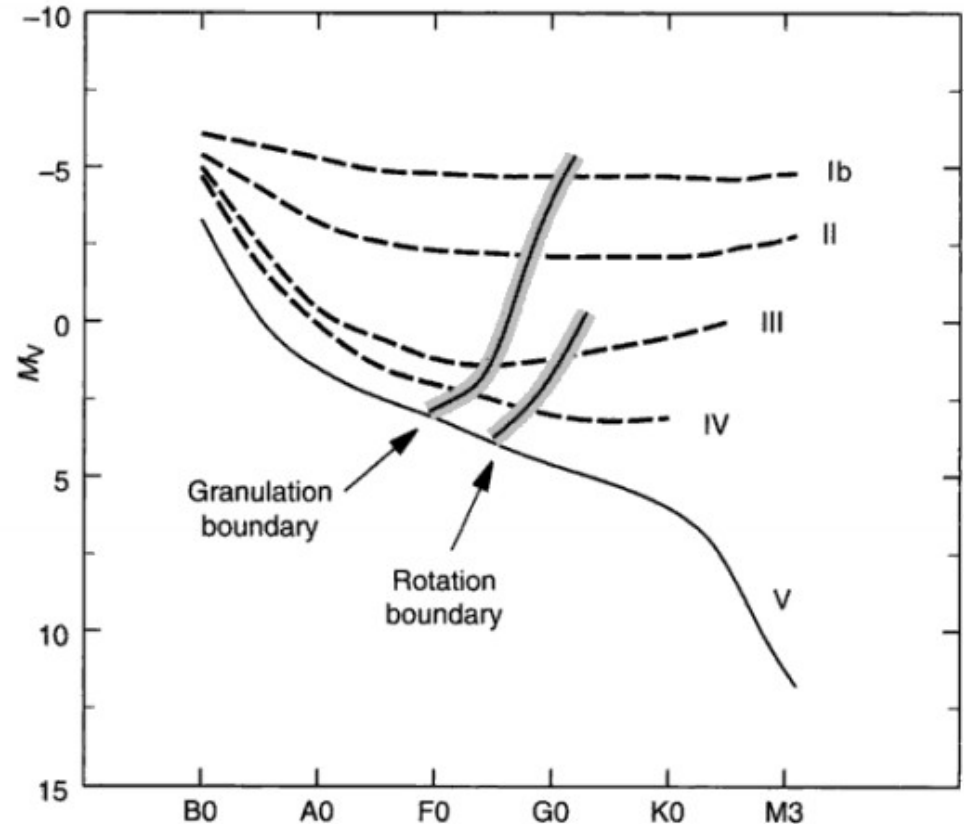


Fig. 17.18. The granulation boundary is the locus of vertical bisectors. The bisectors of the solar type, the “(” shape, are located to the right of the granulation boundary. The bisectors showing the reversed shape, “)”, are found to left of the boundary. The rotation boundary will be discussed in the next chapter, but generally stars on the hot side rotate rapidly, while those on the cool side rotate slowly.

Hvala na pažnji!