

Zvezdani vetrovi



WR 124 je zvezda tipa Wolf-Rayet okružena prstenastom maglinom od izbacenog materijala (M1-67). (HST)



Alpha Cam je zvezda oko 40 puta masivnija od Sunca, 5 puta toplija (30 000K) i oko 600 000 puta luminoznija. Stvara jake udarne talase. (slika sa NASA sajta)

- Kod mnogih zvezda spoljašnji slojevi atmosfera su u konstantnom brzom širenju
- Materijal koje je zvezda izgubila, tj. oduvala - zvezdani vetar

Mehanizmi nastanka zvezdanih vetrova:

- 1) U zvezdama sa konventivnim zonama (kao Sunce), spoljna atmosfera je mehanički zagrejana korona vrlo visoke temperature. Korona ne može biti u statičkoj ravnoteži sa međuzvezdanom sredinom; širi se supersonično;
 - 2) Kod zvezda ranih spektralnih klasa, visoke luminoznosti, intenzivno polje zračenja predaje gasu impuls, stvarajući nadzvučni vetar
- Zvezdani vetrovi imaju važnu ulogu u evoluciji zvezda
 - Zvezdani vetrovi „hrane“ međuzvezdanu sredinu
 - razmatrani su vetrovi sa usamljenih zvezda, a kod dvojnih sistema događaju se veliki masene promene, veliki gubitak mase gde su procesi složeniji

Dva ekstremna slučaja:

- Masivni vetrovi, optički debeli u spektralnim linija proizvode emisione linije i P-Cygni profile. Brzina gubitka mase usled vetra iznosi $\dot{M} \approx 10^{-5} M_{\text{sunca}}/\text{godina}$
- Prozračni, optički tanki vetrovi gubitak mase je $\dot{M} \approx 10^{-14} M_{\text{sunca}}/\text{godina}$

Vetrovi kod vrelih zvezda

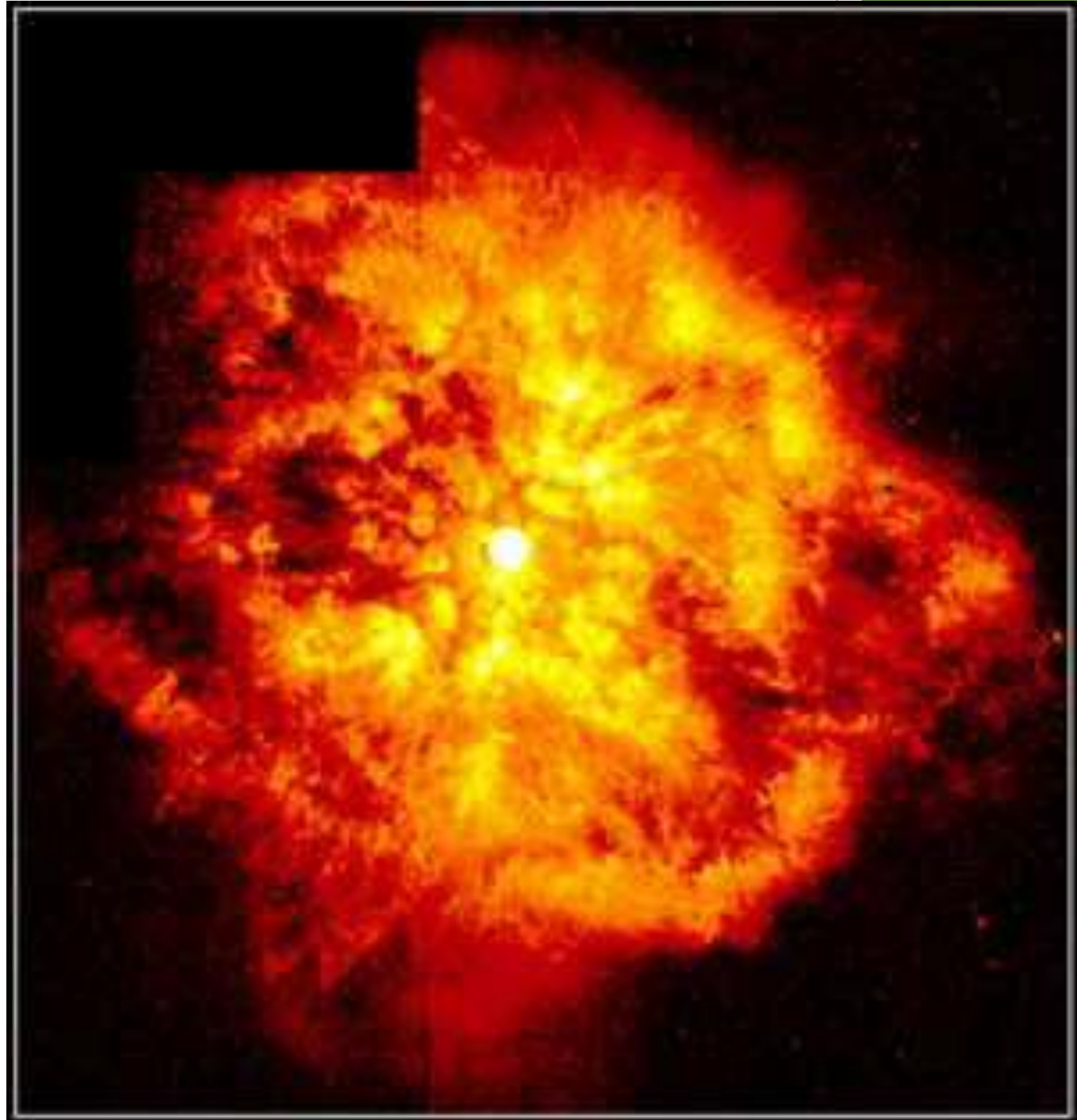
- Vetrovi kod vrelih zvezda potiču od pritiska zračenja
- Vrele masivne zvezde (mase veće od 20 masa Sunca) imaju jake vetrove u svim fazama evolucije. Sve vrele sjajne zvezde pokazuju vrlo asimetrične profile UV linija CIV, SiIV, NV... Za nekoliko miliona godina koliko su na glavnom nizu gube masu brzinom 10^{-6} mase Sunca godišnje



Zeta Ophiuchi je vrela zvezda.

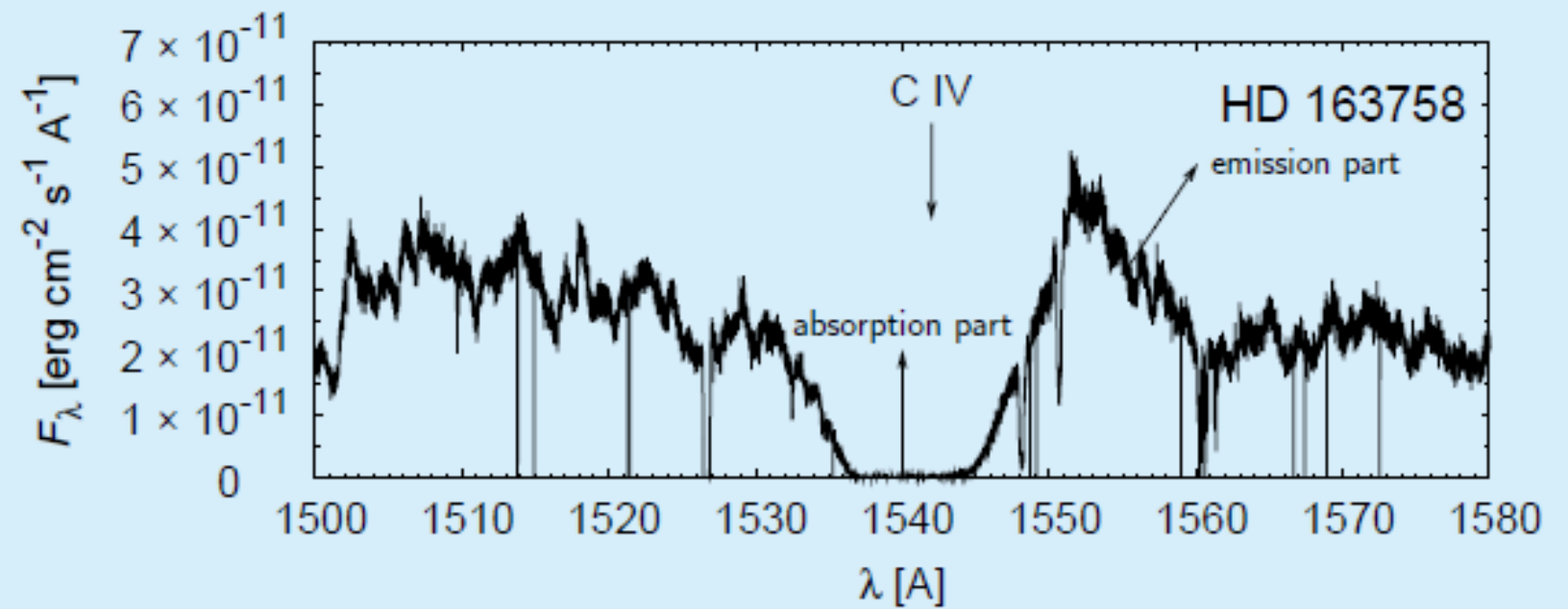
Posmatranja vrelih zvezda

- Omotač oko vrele zvezde



Posmatranja vrelih zvezda

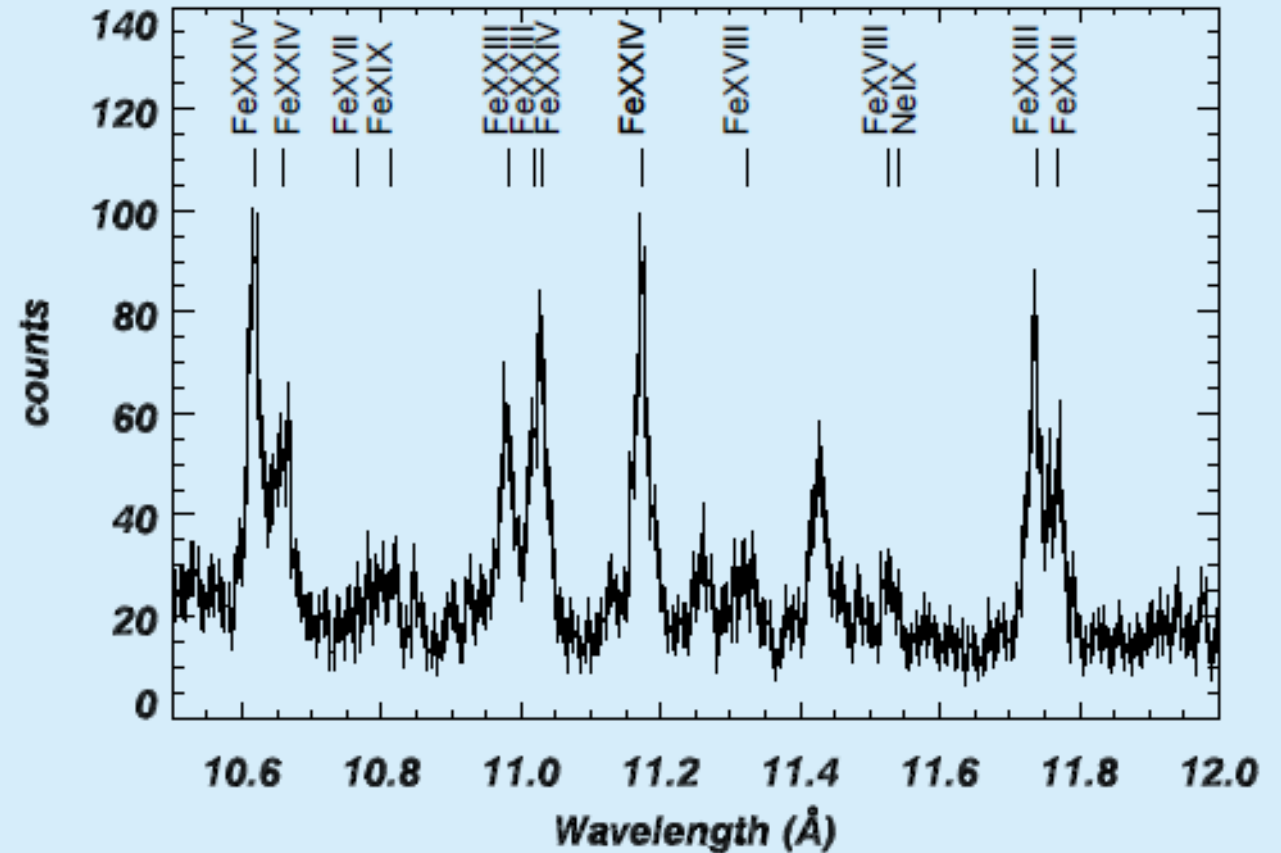
- P Cygni profil linije u UV oblasti - nadzvučno oduvavanje materije sa vrela zvezde- postojanje vetra



HD 163758 (HST)

Posmatranja vrelih zvezda

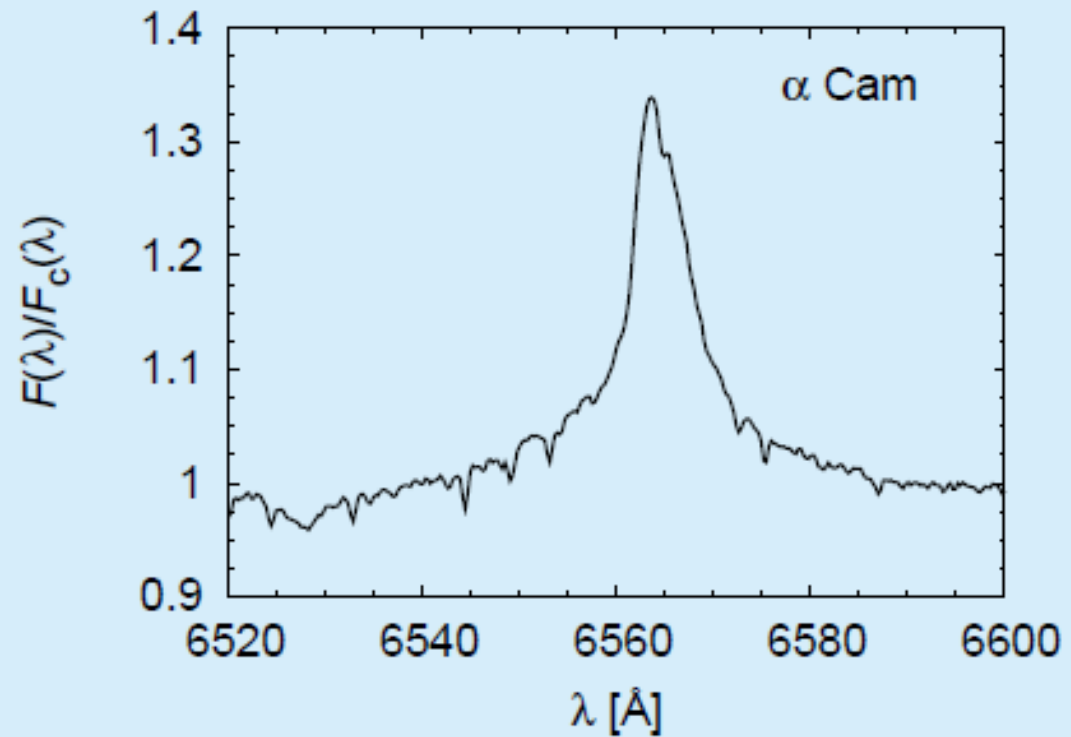
- Emisione linije u X domenu - udari u vetru



X-ray spectrum θ^1 Ori C
(CHANDRA, Schulz et al. 2003)

Posmatranja vrelih zvezda

- H α emisiona linija - rekombinacija



α Cam, 2m telescope in Ondřejov (Kubát 2003)

Zašto vetar duva?

- Neka sila ubrzava materijal sa zvezdanih atmosfera do cirkumstelarnog omotača

$$f_{\text{rad}} = \frac{1}{c} \int_0^{\infty} \chi(r, \nu) F(r, \nu) d\nu$$

- spherically symmetric case
- $\chi(r, \nu)$ absorption coefficient
- $F(r, \nu)$ radiative flux

radiative force due to the light scattering on free electrons

$$\chi(r, \nu) = \sigma_{\text{Th}} n_e(r)$$

- σ_{Th} Thomson scattering cross-section
- $n_e(r)$ electron density

$$f_{\text{rad}} = \frac{\sigma_{\text{Th}} n_e(r) L}{4\pi r^2 c}$$

$$L = 4\pi r^2 \int_0^{\infty} F(r, \nu) d\nu$$

$$f_{\text{grav}} = \frac{\rho(r) GM}{r^2}$$

$$\Gamma \equiv \frac{f_{\text{rad}}}{f_{\text{grav}}} = \frac{\sigma_{\text{T}} \frac{n_e(r)}{\rho(r)} L}{4\pi c GM}$$

$$\Gamma \approx 10^{-5} \left(\frac{L}{1 L_{\odot}} \right) \left(\frac{M}{1 M_{\odot}} \right)^{-1}$$

- example: α Cam, $L = 6.2 \times 10^5 L_{\odot}$,
 $M = 43 M_{\odot}$, $\Gamma \approx 0.1$



Radijativna sila usled rasejanja na slobodnim elektronima je važna, ali ne prevazilazi gravitacionu silu

$$f_{\text{rad}} = \frac{1}{c} \int_0^{\infty} \chi(r, \nu) F(r, \nu) d\nu$$

- radiative force due to the line transitions

$$\chi(r, \nu) = \frac{\pi e^2}{m_e c} \sum_{\text{lines}} \varphi_{ij}(\nu) g_i f_{ij} \left(\frac{n_i(r)}{g_i} - \frac{n_j(r)}{g_j} \right)$$

- $\varphi_{ij}(\nu)$ line profile, $\int_0^{\infty} \varphi_{ij}(\nu) d\nu = 1$
- f_{ij} oscillator strength
- $n_i(r)$, $n_j(r)$ level occupation number, g_i , g_j statistical weights

$$f_{\text{lines}}^{\text{max}} = \frac{\pi e^2}{m_e c^2} \sum_{\text{lines}} g_i f_{ij} \left(\frac{n_i(r)}{g_i} - \frac{n_j(r)}{g_j} \right) F(r, \nu_{ij})$$

- ν_{ij} is the line center frequency

$$f_{\text{grav}} = \frac{\rho(r)GM}{r^2}$$

$$\frac{f_{\text{line}}^{\text{max}}}{f_{\text{grav}}} = \frac{L e^2}{4 m_e \rho G M c^2} \sum_{\text{line}} f_{ij} n_i(r) \frac{L_\nu(\nu_{ij})}{L}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\pi e^2 f_{ij}}{\nu_{ij} m_e c}$$

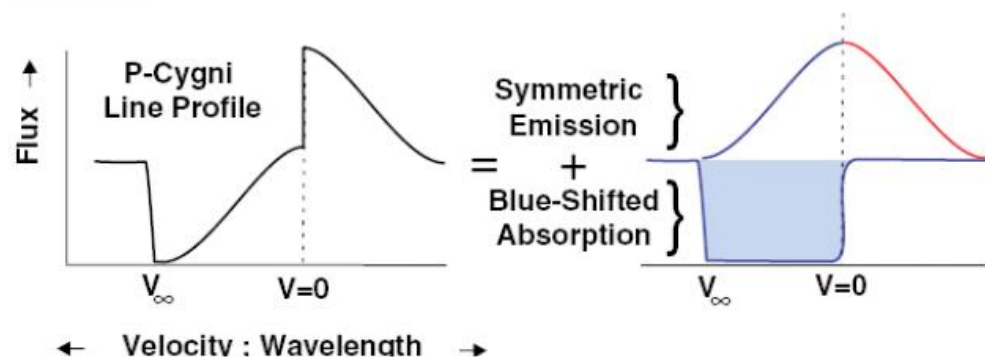
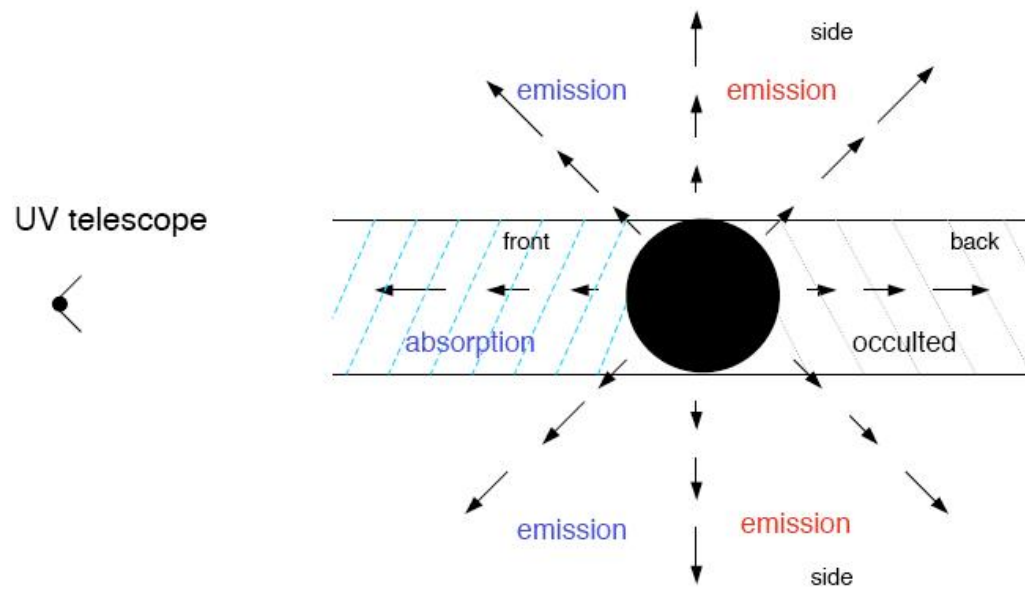
$$\frac{f_{\text{lines}}^{\text{max}}}{f_{\text{grav}}} = \Gamma \sum_{\text{lines}} \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{\text{Th}}} \frac{n_i}{n_e} \frac{\nu_{ij} L_\nu(\nu_{ij})}{L}$$

n_i/n_e je malo za vodonik i neutralan helijum, ali nije za jonizovan helijum i teže elemente (Fe, C, N, O)

$$\sigma_{ij}/\sigma_{\text{Th}} \approx 10^7 \Rightarrow f_{\text{line}}^{\text{max}}/f_{\text{grav}} \text{ up to } 10^3$$

(for many O stars $f_{\text{lines}}^{\text{max}}/f_{\text{grav}} \approx 2000$, Abbott 1982, Gayley 1995)

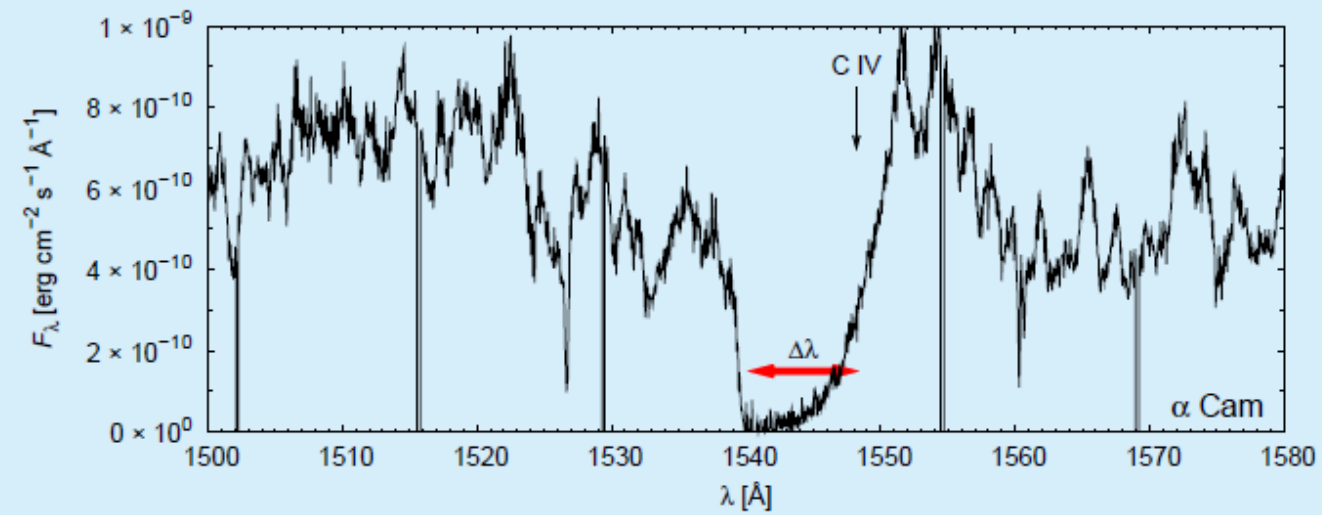
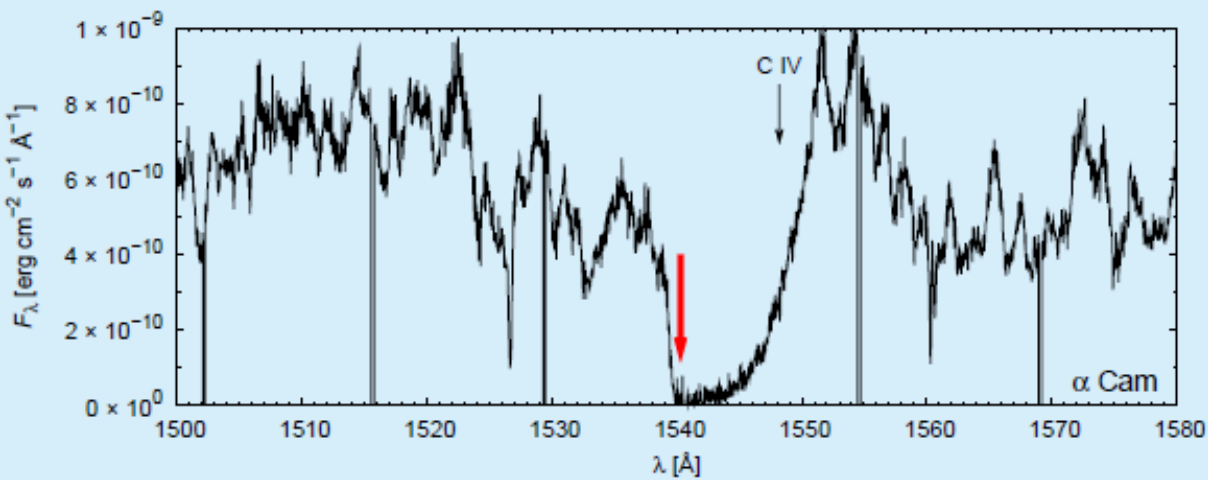
P Cygni profil linije



Terminalna brzina vetra

- Iz **saturisanih** linija moguće je odrediti terminalnu brzinu tj. maksimalnu brzinu zvezdanog vetra

- IUE spectrum of α Cam



$$v_\infty = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c$$

$$\Delta\lambda = 7.9 \text{\AA} \Rightarrow v_\infty = 1500 \text{ km s}^{-1}$$

Preuzeto sa prezentacije: Jiri Kriticka „Stellar winds of hot stars“

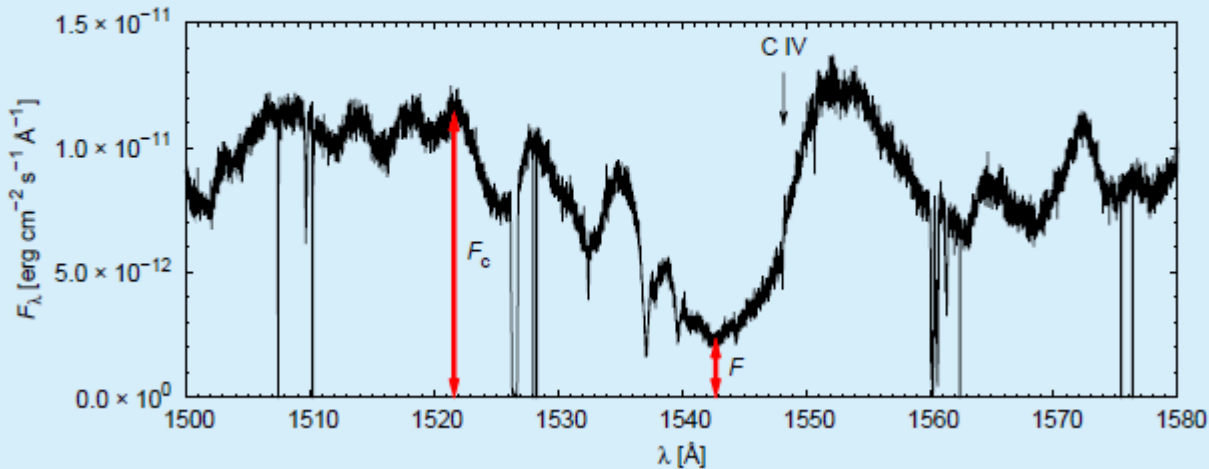
TABLE 2
IDENTIFIED LINES IN THE SPECTRA OF δ , ϵ , ζ , AND ι ORIONIS

Star & No	Ion	λ Measured (\AA)	λ Laboratory (\AA)	$\Delta\lambda$ Correction (\AA)	λ Corrected (\AA)	$\Delta\lambda$ Shift (\AA)	Radial Velocity km sec ⁻¹
δ Ori							
1 ...	H I abs	1216.42	1215.67	-0.75	1215.67	...	...
2 ..	Si IV abs	1388.92	1393.76	.. ..	1388.17	-5.59	-1200
3	Si IV abs	1395.87	1402.77	. .	1395.12	7.65	1630
ϵ Ori:							
1...	Si IV abs	1390.24	1398.26	....	1389.34	8.92	1910
2.	Si IV em	1401.72	1402.77	(+1.05)	1400.82	.. ..	....
3 ..	C IV abs	1541.48	1549.48	.. ..	1540.58	8.90	1720
4.	C IV em	1550.38	1549.48	-0.90	1549.48	.. ..	..
ζ Ori:							
1...	H I abs	1216.96	1215.67	-1.29	1216.01	.. ..	....
2	Si IV abs	1385.42	1393.76	... ..	1384.47	9.29	2000
3 .	Si IV abs	1394.52	1402.77	. .	1393.57	9.20	1970
4	Si IV em	1403.17	1402.77	-0.40	1402.22	. . .	....
8	C IV abs	1541.22	1549.48	. ..	1540.27	9.21	1780
9 .	C IV em	1550.63	1549.48	-1.15	1549.68	.. .	...
ι Ori:							
1 ..	Si IV abs	1374.27	1393.76	.....		19.49	4190
2	Si IV abs	1383.19	1402.77	.. ..	.. .	19.58	4180
4	C IV abs	1533.29	1549.48	. . .		-16.19	-3130

Mass loss rate

- Iz **nesaturisanih** profila linija koje potiču od vetra moguće je izvesti brzinu gubljenja mase

- HST spectrum of HD 13268



$$\frac{F}{F_c} \approx \exp[-\tau(\mu = 1)] \quad \tau(\mu = 1) = \frac{\chi_{LC}}{\nu_0} \left(\frac{dv}{dr} \right)^{-1}$$

$$\tau(\mu = 1) = \frac{\pi e^2}{m_e c} g_i f_{ij} \left(\frac{n_i(r)}{g_i} - \frac{n_j(r)}{g_j} \right) \frac{c}{\nu_0} \left(\frac{dv}{dr} \right)^{-1}$$

$$\tau(\mu = 1) = \frac{\pi e^2}{m_e c} \lambda_{ij} f_{ij} n_i(r) \left(\frac{dv}{dr} \right)^{-1}$$

$$\tau(\mu = 1) = \frac{\pi e^2}{m_e c} \lambda_{ij} f_{ij} \frac{q_{CIV} Z_C}{4\pi m_H} \frac{\dot{M}}{vr^2} \left(\frac{dv}{dr} \right)^{-1}$$

- Z_C is the carbon number density relatively to H
- q_{CIV} is the ionisation fraction of CIV

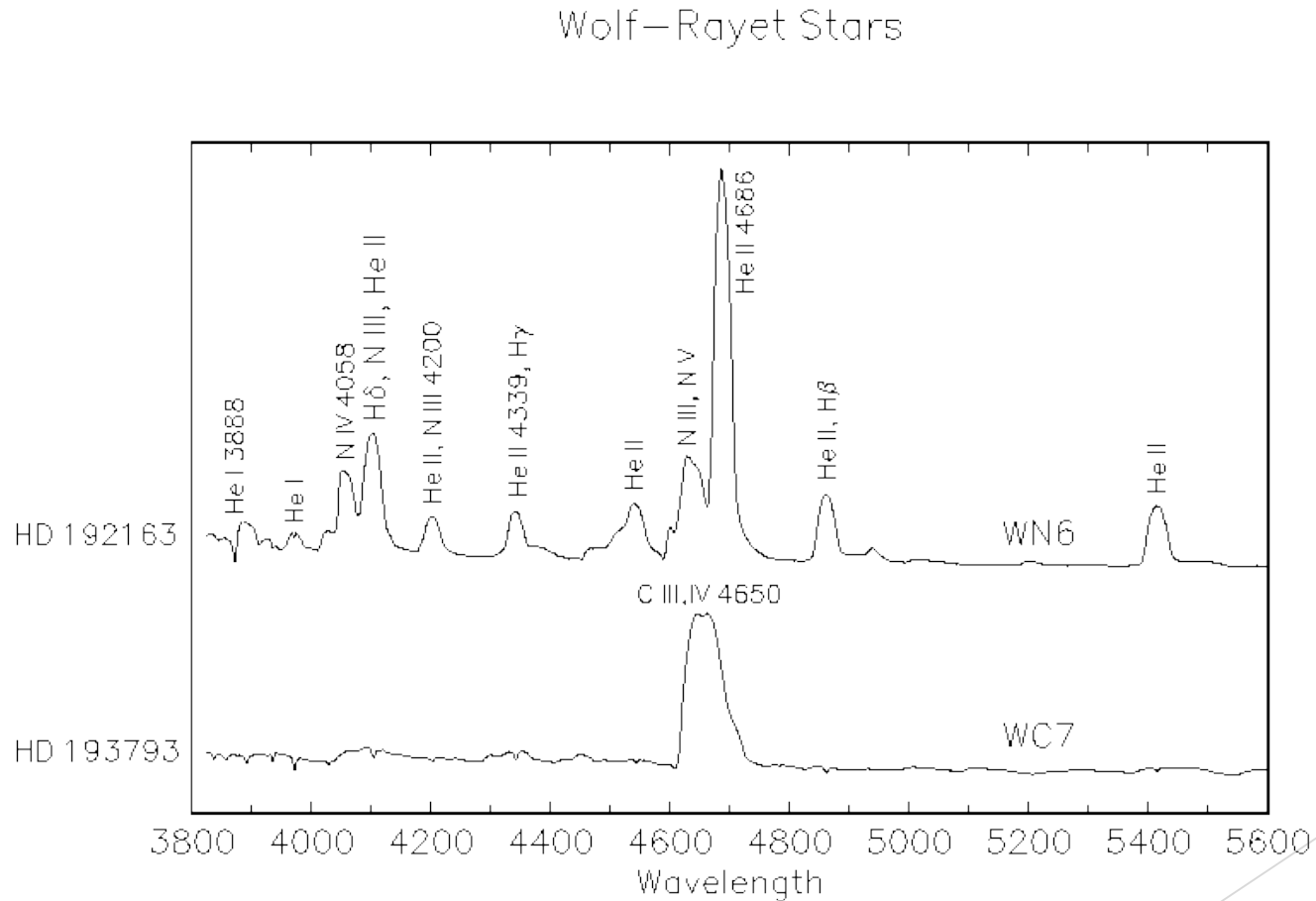
$$\tau(\mu = 1) = \frac{\pi e^2}{m_e c} \lambda_{ij} f_{ij} \frac{Z_C}{4\pi m_H} \frac{1}{v_\infty^2 R_*} q_{CIV} \dot{M}$$

- in our case $q_{CIV} \dot{M} = 4 \times 10^{-10} M_\odot \text{ yr}^{-1}$
- \dot{M} can be derived with a knowledge of q_{CIV}

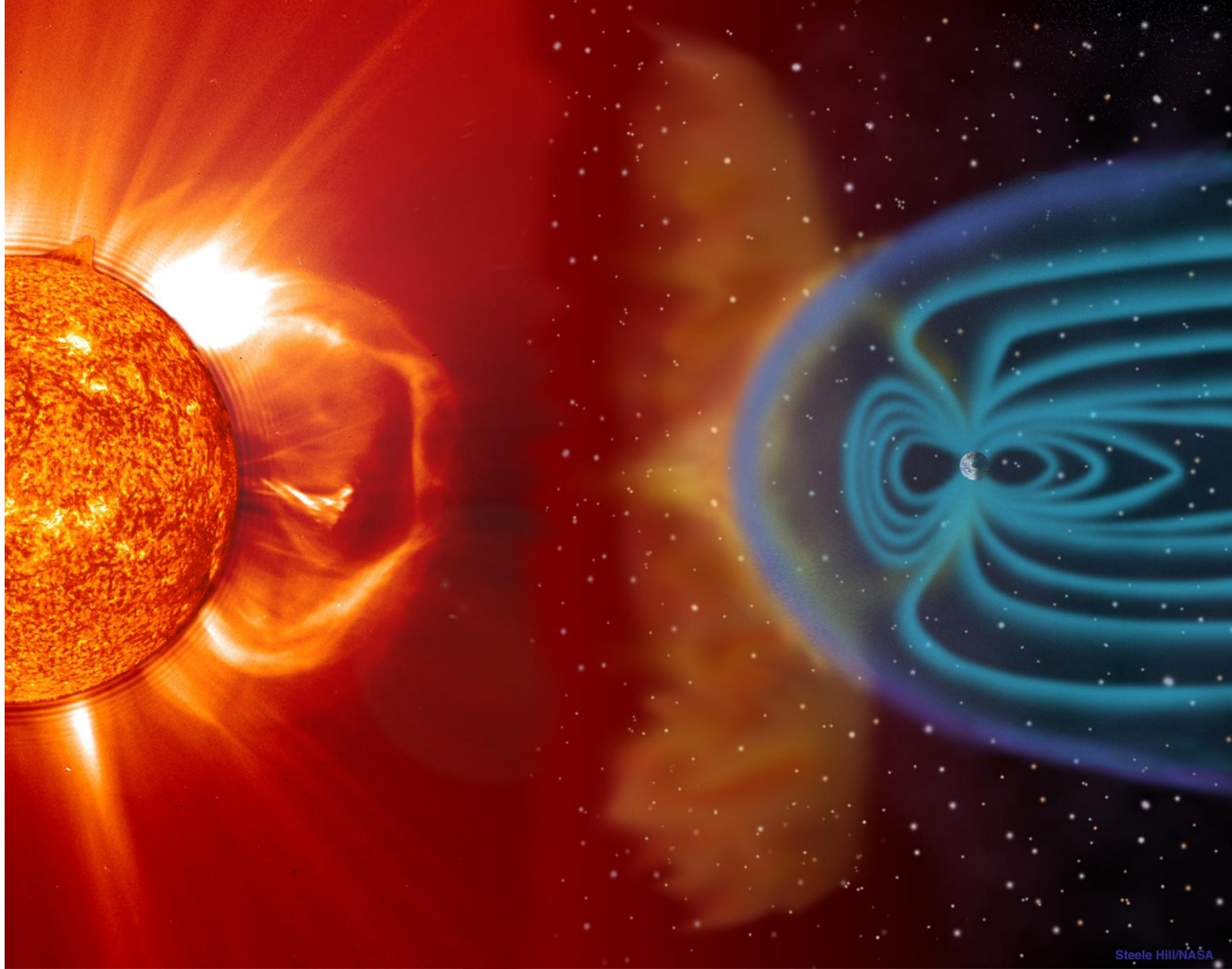
Preuzeto sa prezentacije: Jiri Kriticka „Stellar winds of hot stars“

Wolf-Rayet zvezde

- Vrele, masivne, sjajne zvezde sa veoma jakim vetrom, gubitak mase je $\dot{M}=10^{-5} M_{\text{sunca}}/\text{godina}$
- Wolf Rayet zvezde se dele prema emisionim linijama u spektru, sa širokim linijama He i N su **WN**, a sa He i C+O su **WC**



Koronalni vetrovi



- Redak i vreo spoljni sloj Sunčeve atmosfere je KORONA
- $n_e \approx 4 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $T \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ K}$
- Može se posmatrati pri pomračenju Sunca, dostiže nekoliko radijusa Sunca
- Najpre se smatralo da je korona statican omotac, ali se mnogo godina potom ustanovilo da Zemlju bombarduju čestice sa Sunca (aurora i geomagnetni efekti)
- Biermann (1951) iznosi prvu ideju o stalnoj emisiji čestica sa Sunca
- Chapman (1959) pokazuje značaj prenosa energije kondukcijom pri visokoj T korone
- Parker (1958, 1963) - statički modeli korone su nekonzistentni, mora postojati širenje korone velikih razmera. Razvio teorijski model vetra malih brzina u blizini Sunca, koje rastu na velikim rastojanjima do velikih supersoničnih vrednosti i predvideo tipične vrednosti brzine, gustine i fluksa čestica u blizini Zemlje.

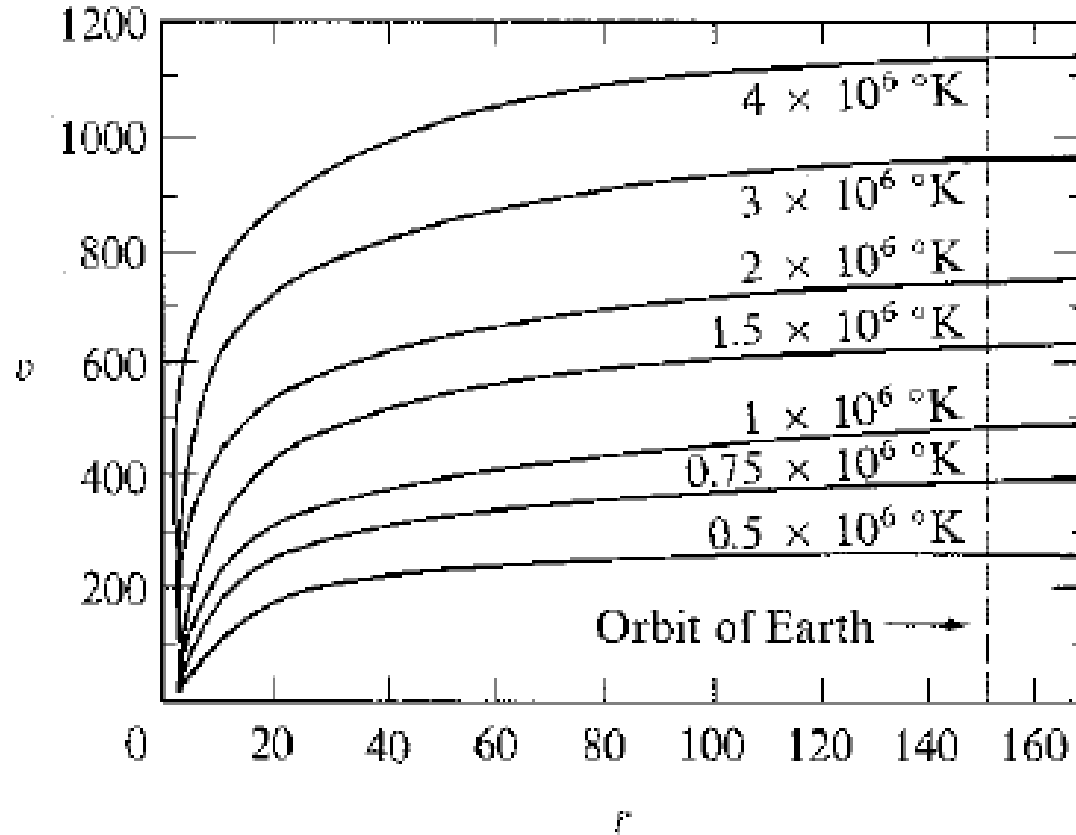


FIGURE 15-2

Isothermal solar wind solutions; curves are labeled with coronal temperature. *Ordinate*: velocity in km s^{-1} ; *abscissa*: heliocentric distance in 10^6 km. From (496), by permission.

- Vrednosti mirnog solarnog vetra u Zemljinoj orbiti:

radijalna komponenta brzine vetra: 300-325 km/s

gustina elektrona (protona): 9 cm^{-3}

prosečna elektronska temperatura $1.5 \cdot 10^5 \text{ K}$

intenzitet magnetnog polja: $5 \cdot 10^{-5} \text{ Gauss}$

$$\dot{M} = 4\pi r^2 n v m = 2 * 10^{-14} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$$

- Gubici mase po klasama:

$10^{-14} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ za Sunce (G2 glavni niz),

$2 \cdot 10^{-10} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ K džinovi,

$10^{-8} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ M džinovi,

$10^{-7} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ G i K superdžinovi,

$10^{-6} - 10^{-5} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ M superdžinovi,

$10^{-6} - 10^{-5} M_{\text{sunca}} / \text{godina}$ OB superdžinovi i WR zvezde

- Svi su koronalni vetrovi uglavnom rezultat visoke temperature u koronama (osim kod M zvezda gde pritisak zračenja na čestice prašine može biti značajan).

Vetrovi hladnih sjajnih zvezda

- 1956. Deutsch je prvi proučio vetrove hladnih sjajnih zvezda. Gubici mase i brzine vetra se mogu odrediti iz profila linija Call. Komponente pomerene ka ljubičastom otkrivene 1935. i povezane sa cirkumstelarnim omotačima u širenju. U slučajevima gde se posmatraju oscilacije fotosfere ove linije ne prate Doplerovske pomake fotosferskih linija - dokaz da ne potiču iz fotosfere. Nisu međuzvezdane, jer je jačina linija u korelaciji sa T zvezde. (posmatraju se u spektru pratioca (sistem α Her: GII/III i M zvezde) - cirkumstelarne linije se nikad ne vide u spektru G džina koji je sam)