

## Analisi spettroscopica di oggetti stellari con righe di emissione

Stage Asiago dal 01-02-2006 al 04-02-2006

Tommaso Brotto - Valentina Melli - Chiara Stevanato - Andrea Zocca

Proff. Antonio Del Negro e Antonio Tegon

Licei Scientifici Statali Ugo Morin e Giordano Bruno di Mestre (Ve)

Durante lo stage abbiamo studiato la stella Be HD55806 e la Wolf-Rayet HD56925 prendendone gli spettri con il telescopio da 1,22 m dell'Osservatorio di Asiago. Le osservazioni sono state fatte le notti del 1 e 3 febbraio. Per ogni oggetto sono stati presi uno spettro, alcuni bias e flat field, nonché lo spettro di una stella di confronto. Nei giorni successivi i dati sono stati ridotti per giungere allo spettro calibrato in flusso e lunghezza d'onda.

HD55806 è una stella di tipo Be, ovvero una stella di sequenza principale con righe di emissione. Le stelle Be sono definite come stelle non-supergiganti con una temperatura superficiale tra i 10 e i 30 mila Kelvin, le quali hanno mostrato almeno una volta linee di emissione nel loro spettro. Circa il 20% delle stelle di tipo B sono stelle Be. Come suggerito dalla definizione, le stelle Be sono soggette a variazioni di luminosità nel tempo. Legate alle Be sono le cosiddette shell-stars, stelle aventi linee d'assorbimento molto marcate, dovute a metalli, sovrapposte alle normali linee dell'idrogeno e dell'elio. Attualmente le Be stars passano in maniera apparentemente casuale da B a Be a shell-stars. In figura 1 si può vedere quello che potrebbe essere l'aspetto di una stella Be con un massiccio disco equatoriale.



Figura 1. Rappresentazione pittoresca di un stella Be.

Che cosa distingue una normale stella di classe spettrale B da una stella Be? La prima cosa è l'elevata velocità di rotazione della stella, fino a 450 km/s all'equatore. Questa enorme velocità equatoriale farebbe diminuire la gravità superficiale e creerebbe un anello di gas lungo il piano equatoriale; le shell-stars altro non sarebbero che stelle Be delle quali riusciamo a "vedere" questo disco, soprattutto grazie a metodi interferometrici.

Le stelle Be variano in luminosità e spettro con periodi che vanno da una settimana a qualche decennio. Secondo una recente teoria questa variazione potrebbe essere causata da un'onda a spirale che lentamente gira attorno al disco. Variazioni dell'ordine di giorni o settimane sembrano essere dovute al moto di una stella compagna, nel caso di sistemi binari. Infine ci sono variazioni che vanno da 0.3 a 2 giorni e si suppone siano causate da pulsazioni non radiali o rotazioni.

In figura 2 è riportato spettro di HD55806, una stella di tipo B con righe di emissione scelta dal Catalogue of H-alpha emission stars in the Northern Milky Way di Kohoutek e Wehmeyer (1999).

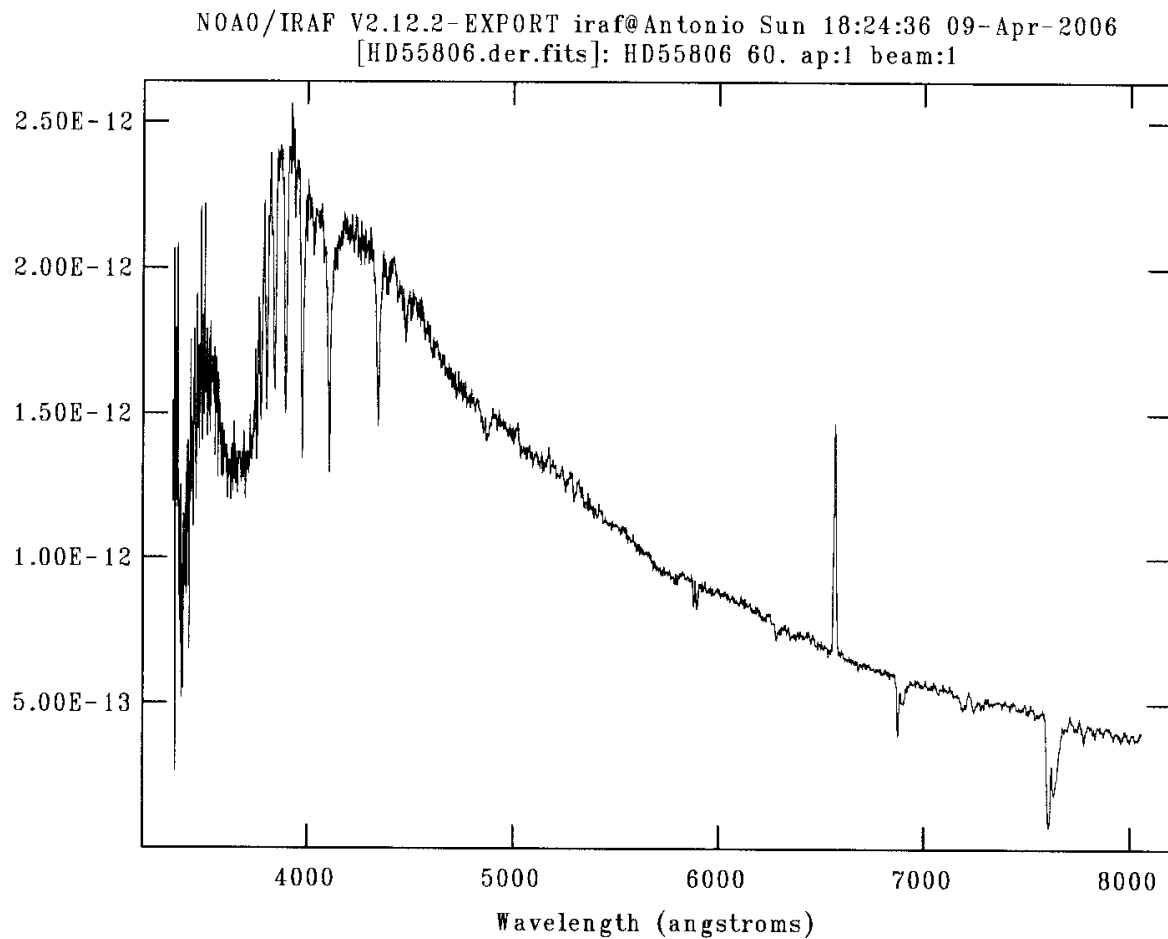


Figura 2. Lo spettro di HD55806 preso al telescopio da 1,22 m dell'Osservatorio di Asiago.

E' un oggetto poco studiato, di cui abbiamo potuto ottenere per la prima volta uno spettro con una buona definizione in tutta la banda visibile, da 3000 a 8000 A; quelli precedenti erano stati ottenuti con il prisma obiettivo. Per prima cosa abbiamo proceduto all'identificazione delle righe spettrali, come in tabella 1

Apr 6 16:21 [HD55806.der.fits]: HD55806

| center   | cont      | flux      | eqw    | core      | gfwhm | righe           |
|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|-----------------|
| 7616.135 | 4.522E-13 | -1.92E-11 | 42.54  | -2.87E-13 | 63.06 | cielo           |
| 7241.958 | 5.280E-13 | -1.17E-12 | 2.219  | -4.90E-14 | 22.45 |                 |
| 6874.085 | 5.932E-13 | -2.87E-12 | 4.833  | -1.82E-13 | 14.81 | cielo           |
| 6566.380 | 6.731E-13 | 1.087E-11 | -16.14 | 8.113E-13 | 12.58 | Halfa 6561.817  |
| 6279.778 | 7.877E-13 | -1.83E-12 | 2.318  | -4.70E-14 | 36.52 |                 |
| 5894.877 | 9.151E-13 | -1.03E-12 | 1.124  | -8.51E-14 | 11.36 |                 |
| 4866.033 | 1.538E-12 | -5.75E-12 | 3.738  | -1.10E-13 | 48.98 | Hbeta 4861.332  |
| 4476.647 | 1.899E-12 | -1.57E-12 | 0.8293 | -1.25E-13 | 11.84 | HeI 4471.688    |
| 4343.660 | 2.051E-12 | -1.14E-11 | 5.544  | -5.52E-13 | 19.35 | Hgamma 4340.468 |
| 4105.920 | 2.068E-12 | -1.15E-11 | 5.582  | -6.67E-13 | 16.26 | Hdelta 4101.737 |

|          |           |           |        |           |       |        |          |
|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|--------|----------|
| 4030.396 | 2.218E-12 | -1.72E-12 | 0.7764 | -1.42E-13 | 11.41 | HeI    | 4026.362 |
| 3974.440 | 2.296E-12 | -1.40E-11 | 6.109  | -8.69E-13 | 15.16 | Heps   | 3970.074 |
| 3938.322 | 2.436E-12 | -2.11E-12 | 0.865  | -2.82E-13 | 7.011 | CaII K | 3934.9   |
| 3893.353 | 2.396E-12 | -1.23E-11 | 5.122  | -8.80E-13 | 13.1  | H8     | 3888.05  |
| 3840.076 | 2.391E-12 | -1.23E-11 | 5.158  | -7.98E-13 | 14.52 | H9     | 3835.39  |
| 3802.807 | 2.290E-12 | -1.13E-11 | 4.916  | -7.41E-13 | 14.27 | H10    | 3797.90  |
| 3775.174 | 1.950E-12 | -5.20E-12 | 2.667  | -5.00E-13 | 9.782 | H11    | 3770.6   |
| 3755.803 | 1.809E-12 | -4.29E-12 | 2.371  | -4.91E-13 | 8.204 | H12    | 3750.2   |

Tabella 1. Le misure fatte sullo spettro di HD55806. In colonna 1 la lunghezza d'onda centrale della riga (Å), in colonna 2 il flusso del continuo al centro (erg/cm<sup>2</sup>/sec), in colonna 3 il flusso integrato della riga (erg/cm<sup>2</sup>/sec), in colonna 4 la larghezza equivalente (Å), in colonna 5 l'intensità del core (erg/cm<sup>2</sup>/sec), in colonna 6 la larghezza a metà altezza o FWHM (Å), in colonna 7 l'identificazione delle righe con la lunghezza d'onda di laboratorio (Å).

Si noti che le lunghezze d'onda misurate sono shiftate verso il rosso rispetto a quelle reali di una quantità costante pari a circa 4-5 Å, che potrebbe essere interpretata come effetto Doppler; in realtà, identico shift si rileverà poi nello spettro della Wolf-Rayet, per cui siamo più propensi a considerarlo un difetto di calibrazione. In figura 3 si vede l'identificazione delle principali righe sullo spettro.

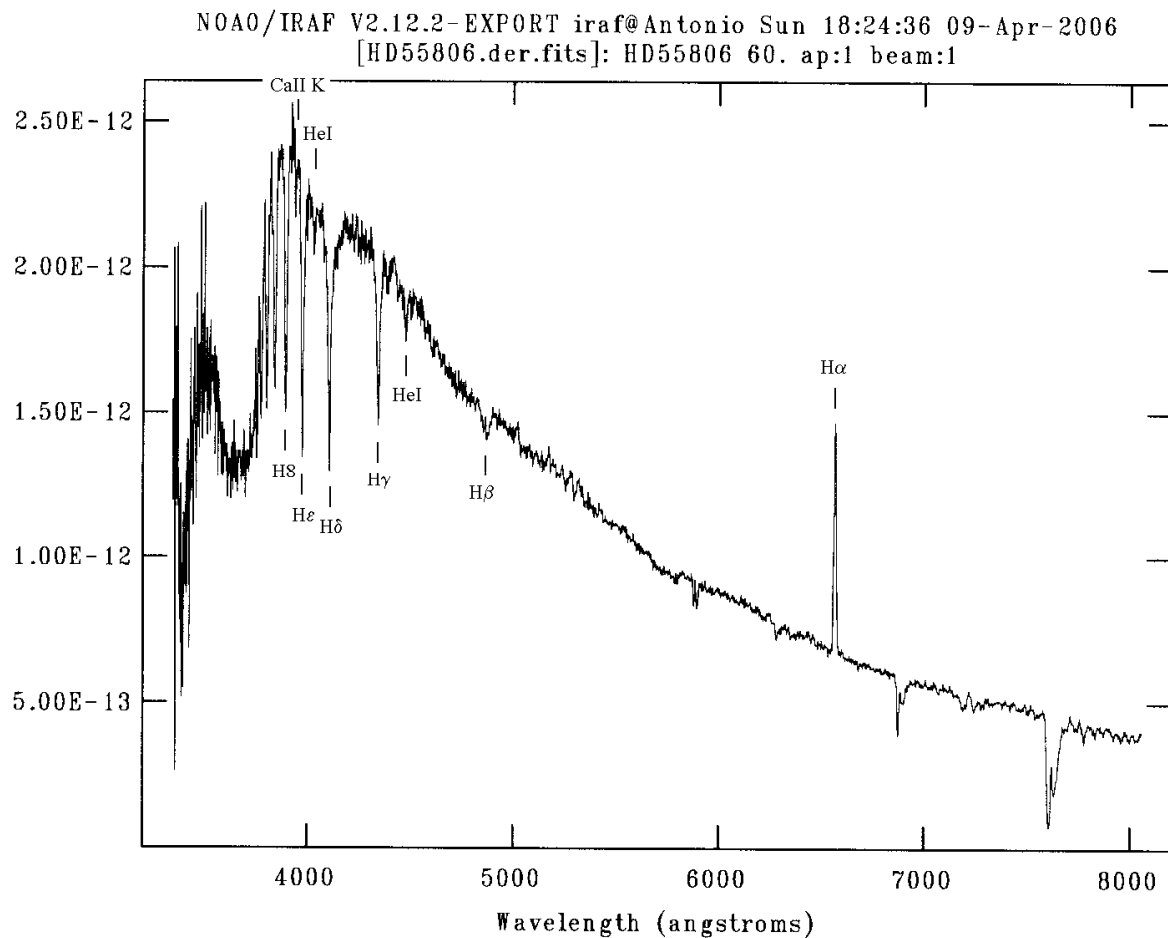


Figura 3. L'identificazione delle principali righe di HD55806.

Si vede che è presente tutta la serie di Balmer dell'idrogeno con H $\alpha$  in emissione e alcune righe dell'elio neutro, tipiche delle stelle di tipo B; altre righe dell'elio neutro sono sovrapposte a quelle dell'idrogeno, avendo identica lunghezza d'onda. Caratteristica anche la riga K del CaII.

Abbiamo fatto anche un tentativo di classificazione spettrale di tipo quantitativo: purtroppo, per queste stelle la classificazione spettrale è alquanto complicata in quanto le intensità relative delle righe dell'elio neutro, che sono usate solitamente per stelle di questa temperatura, sono qui falsate dalla presenza dell'emissione, per cui si preferisce usare le righe del SiIV e SiIII per le early-type B e il rapporto tra le intensità delle righe dell'HeI a 4471 Å e del MgII a 4481 Å per le late-type B. Ma tali righe nei nostri spettri non sono facilmente visibili a causa dell'addensamento delle righe verso la testa della serie di Balmer, e sarebbe stato necessario uno spettro a maggiore definizione in un range spettrale più limitato.

Per questo motivo abbiamo preferito una classificazione "ad occhio" confrontando lo spettro di HD55806 con spettri di confronto disponibili sul sito dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, come in figura 4.

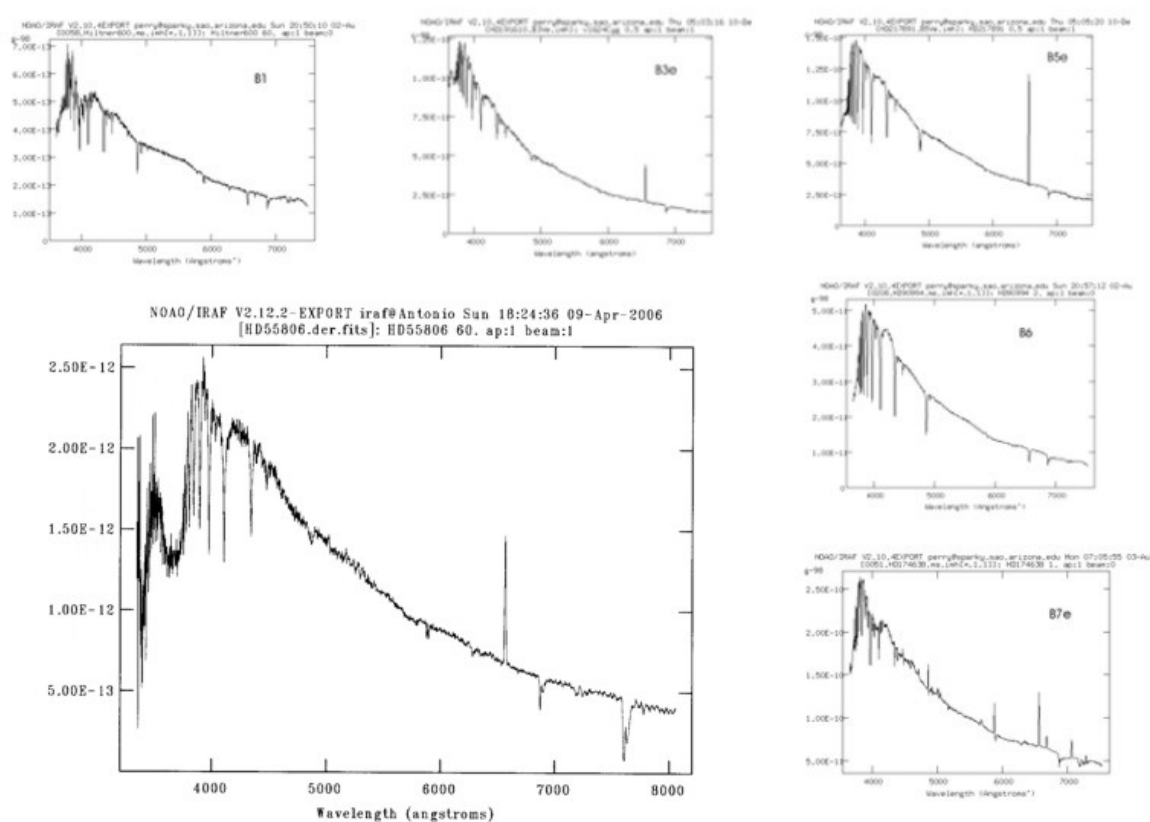


Figura 4. Lo spettro di HD55806 (in basso a sinistra) confrontato con spettri di stelle B e Be standard.

Si vede chiaramente che nei primi tipi B le righe della serie di Balmer sono poco intense, a causa della temperatura più elevata, mentre sono molto evidenti quelle dell'elio neutro; la situazione si capovolge verso gli ultimi tipi B, in cui le righe dell'elio sono molto meno evidenti. Questo suggerisce che HD55806 sia una stella di tipo Be avanzato, da B7 a B9; l'unico riferimento in letteratura la classifica come Be9V, classificazione fatta "ad occhio" su spettri ottenuti con il prisma obiettivo.

Abbiamo poi cercato di avere una indicazione sulla temperatura di questa stella facendo un'interpolazione dello spettro con una curva di corpo nero usando il task FITTING del pacchetto di applicazioni STSDAS di IRAF: per quanto il fit possa essere affetto da errori (il massimo per queste stelle è nell'ultravioletto) il risultato è riportato in figura 5.

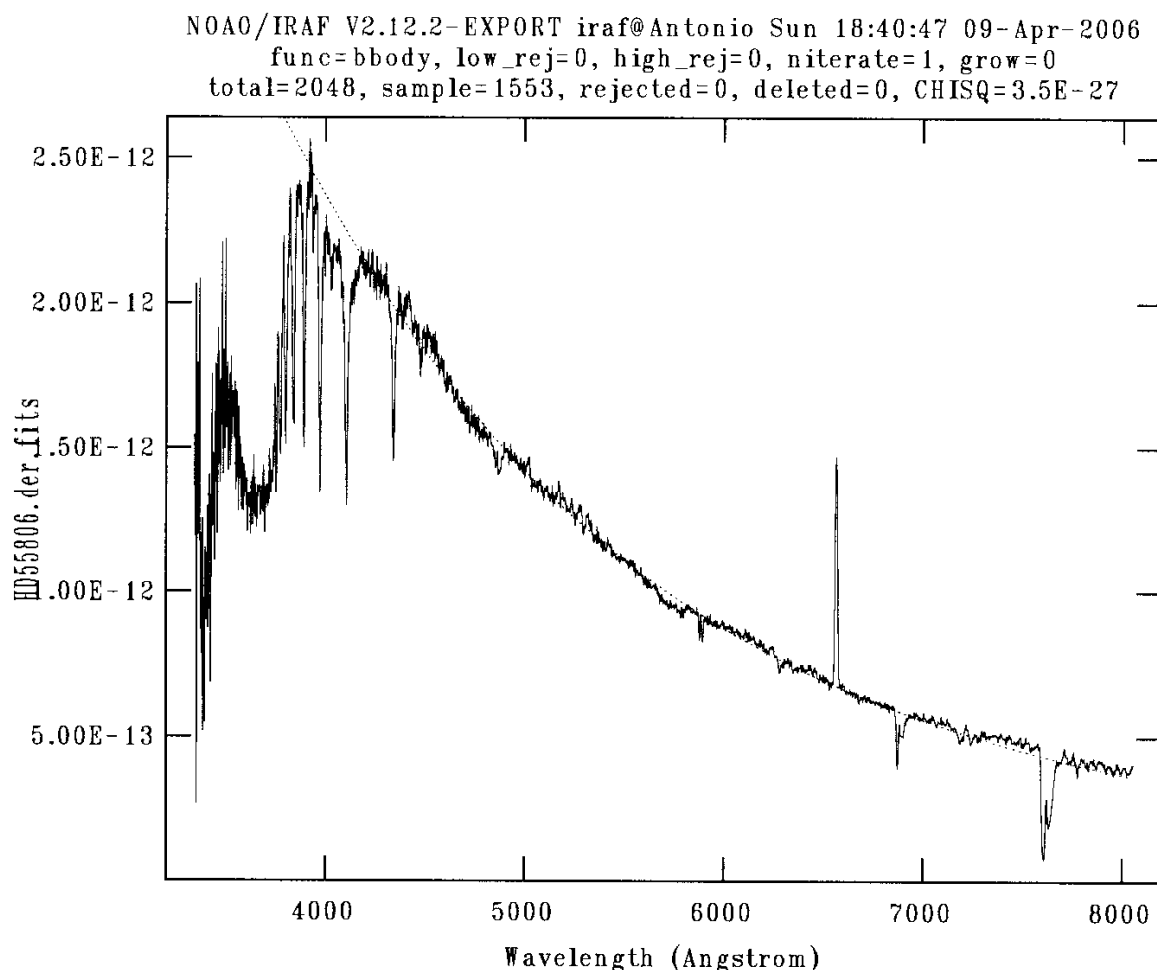


Figura 5. L'interpolazione dello spettro di HD55806 con una planckiana (curva tratteggiata).

Estraendo i coefficienti della planckiana, la temperatura può essere stimata attorno ai 12800 K, che corrisponde bene ad un tipo spettrale B avanzato (siamo quasi al limite con stelle di tipo A).

Infine, abbiamo tentato di stimare la velocità di rotazione di quest'oggetto, usando il metodo della Full Width (GFWHM = Gaussian Full Width at Half Maximum) applicato alle righe dell'HeI. Infatti, l'elevata velocità di rotazione produce un notevole allargamento delle righe spettrali, dal quale si può risalire al prodotto  $v \sin i$ , dove  $v$  è la velocità di rotazione e  $i$  l'angolo tra l'asse di rotazione e la visuale. Abbiamo preso le uniche due righe che avevamo identificato con sicurezza, la 4471 e la 4026, per le quali avevamo rispettivamente una FW osservata di 11,84 Å e 11,41 Å; abbiamo corretto per il valore della FW strumentale usando la formula

$$FW_i = \sqrt{(FW_o)^2 - (FW_s)^2}$$

(i = intrinseca, o = osservata, s = strumentale) ottenendo una FW intrinseca rispettivamente di 8,24 Å e 7,61 Å (la FW strumentale era 8,5 Å). Infine abbiamo applicato le due formule

$$v \sin i = 41,25 \cdot FW(4471) \text{ km/s}$$

$$v \sin i = 45,82 \cdot FW(4026) \text{ km/s}$$

ottenendo in entrambi i casi una velocità di rotazione di circa 170 km/s, compatibile con quelle misurate per altri oggetti di questo tipo ;per approfondimenti sulle formule usate si veda Steele I.A., Negueruela I. e Clark J.S., Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **137**, 147-156, (1999).

HD56925 è una stella Wolf-Rayet. Le Wolf-Rayet sono stelle molto luminose (oltre  $100 L_{\odot}$ ) e molto calde (fino a 100 000 K), i cui spettri sono dominati da righe di emissione intense e larghe, associate a shell massicce che si espandono verso l'esterno con velocità dell'ordine di 1000-2500 km/s. Le Wolf-Rayet sono classificate in due sequenze, quella dell'azoto, che mostra molte righe di emissione dell'azoto ionizzato (stelle WN), e quella del carbonio, i cui spettri sono dominati dalle righe di emissione del carbonio ionizzato (stelle WC). Nelle stelle WN è importante notare le forti righe di emissione del NIII, NIV e NV e quelle dell' HeII. Si osservi, inoltre, che la riga dell' HeI a 3888 Å presenta un classico profilo "P-Cygni" dovuto al massiccio vento stellare dell'oggetto.

Il processo di formazione delle Wolf-Rayet non è ancora stato ben compreso: la presenza in superficie di materiale del nucleo suggerisce due scenari possibili: un mescolamento tra strati interni ed esterni, dovuto a rotazione differenziale o ad aumento del core convettivo, o la perdita degli strati esterni dovuta a vento stellare o all'azione di una compagna in un sistema binario (fuoriuscita di materiale dal lobo di Roche). Anche se quest'ultima ipotesi spiegherebbe molto bene le caratteristiche di questi oggetti, non si può dimenticare che molte Wolf-Rayet non fanno parte di sistemi multipli. L'ipotesi più accreditata comunque è che queste stelle rappresentino l'evoluzione di stelle O di massa superiore a  $40 M_{\odot}$ ; esse sono molto rare a causa della piccola durata di questa fase (circa 150 nella nostra galassia).

Il vento stellare porta a perdite di massa dell'ordine di  $10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot}$  per anno. La velocità del vento stellare aumenta con la distanza dalla stella, fino a raggiungere un massimo che viene detta velocità terminale e che può essere fino a tre volte la velocità di fuga.

Tutte le Wolf-Rayet mostrano una relazione tra la variabilità e la luminosità: la variabilità risulta maggiore per elevate luminosità, che corrispondono alle fasi in cui la stella è più fredda. Perciò, quando la stella diventa più calda, diventa anche più stabile. La variabilità è dell'ordine di un giorno.

In figura 7, lo spettro di HD56925, una Wolf-Rayet che si trova all'interno della nebulosa NGC2359, che viene eccitata dalla radiazione e dal forte vento (fino a 2000 km/s) della stella centrale (vedi figura 6).



Figura 6. La nebulosa NGC2659 con al centro la Wolf-Rayet HD56925, indicata dalla freccia.

NOAO/IRAF V2.12.2-EXPORT iraf@Antonio Sun 18:27:03 09-Apr-2006  
 [HD56925.der.fits]: HD56925 900. ap:1 beam:1

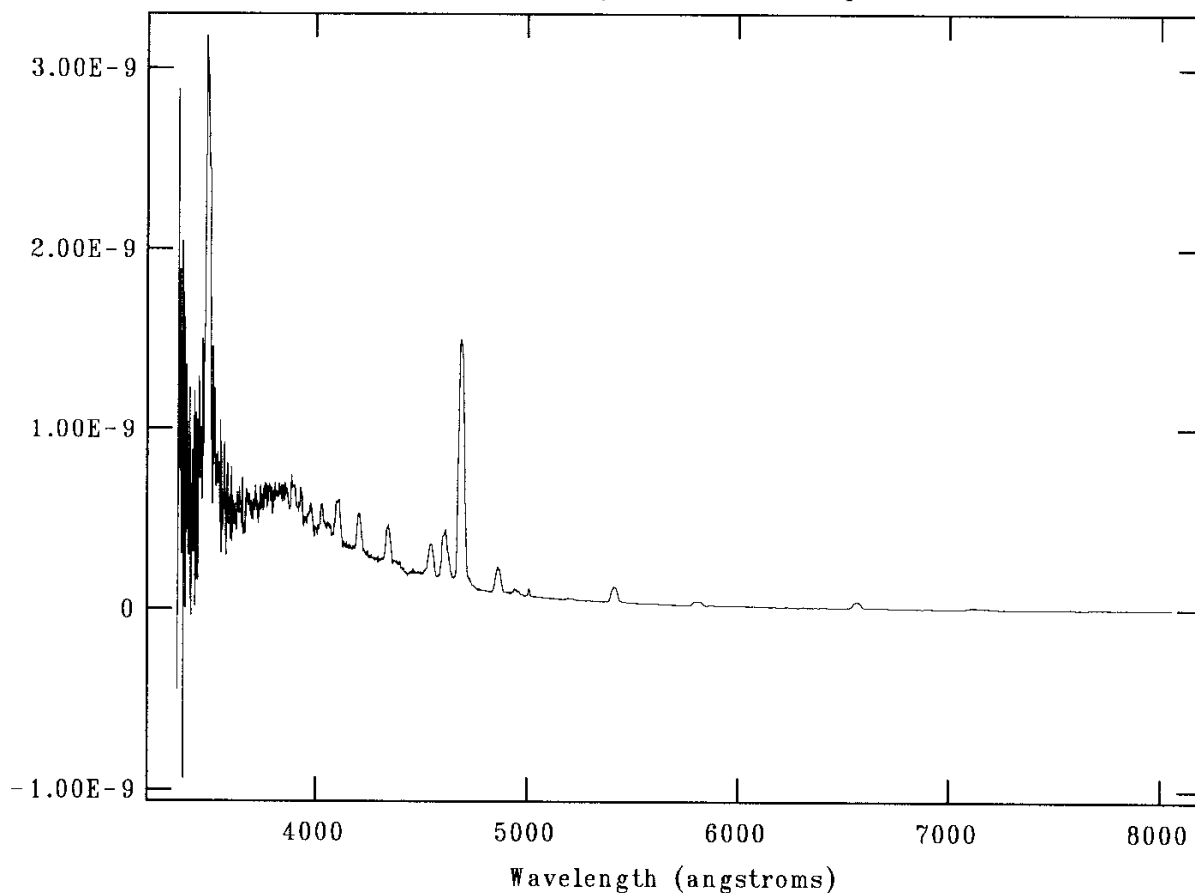


Figura 7. Lo spettro di HD56925 preso al telescopio da 1,22 m dell'osservatorio di Asiago.

Anche qui, per prima cosa abbiamo proceduto alla identificazione delle righe spettrali, come si vede dalla tabella 2

Apr 6 17:33 [HD56925.der.fits]: HD56925

| center   | cont      | flux      | eqw    | core      | gfwhm | righe  |          |
|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|--------|----------|
| 6564.962 | 1.002E-11 | 1.5151E-9 | -151.2 | 3.617E-11 | 39.35 | Halfa  | 6562.817 |
| 5809.509 | 2.323E-11 | 1.2392E-9 | -53.35 | 2.638E-11 | 44.13 | CIV    | 5808     |
| 5416.549 | 4.218E-11 | 2.8099E-9 | -66.62 | 8.697E-11 | 30.35 | HeII   | 5411.524 |
| 5206.158 | 5.433E-11 | 2.988E-10 | -5.501 | 7.607E-12 | 36.9  |        |          |
| 5010.845 | 7.317E-11 | 3.430E-10 | -4.687 | 4.589E-11 | 7.022 |        |          |
| 4949.427 | 8.287E-11 | 8.373E-10 | -10.1  | 2.566E-11 | 30.66 |        |          |
| 4864.062 | 9.118E-11 | 4.1871E-9 | -45.92 | 1.423E-10 | 27.65 | Hbeta  | 4861.322 |
| 4691.010 | 1.517E-10 | 4.3749E-8 | -288.3 | 1.4407E-9 | 28.53 | HeII   | 4685.682 |
| 4612.306 | 1.726E-10 | 8.8529E-9 | -51.3  | 2.666E-10 | 31.2  | NV     | 4603     |
| 4545.205 | 1.827E-10 | 5.4458E-9 | -29.8  | 1.809E-10 | 28.28 | HeII   | 4541.59  |
| 4343.372 | 2.588E-10 | 5.1625E-9 | -19.95 | 2.112E-10 | 22.97 | Hgamma | 4340.468 |
| 4204.324 | 3.242E-10 | 4.9171E-9 | -15.17 | 2.096E-10 | 22.04 | HeII   | 4200     |
| 4105.890 | 3.741E-10 | 6.5453E-9 | -17.49 | 2.439E-10 | 25.21 | Hdelta | 4101.737 |
| 4029.504 | 4.409E-10 | 2.1798E-9 | -4.944 | 1.356E-10 | 15.1  |        |          |
| 3975.741 | 4.381E-10 | 2.7681E-9 | -6.319 | 1.295E-10 | 20.08 | HeI    | 3970.1   |

|          |           |           |        |           |       |  |
|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|--|
| 3931.010 | 4.931E-10 | 2.0029E-9 | -4.062 | 1.485E-10 | 12.67 |  |
|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|--|

Tabella 2. Le misure fatte sullo spettro di HD56925. Per la legenda, si veda la Tabella 1.

In figura 8 si riporta l'identificazione delle principali righe sullo spettro.

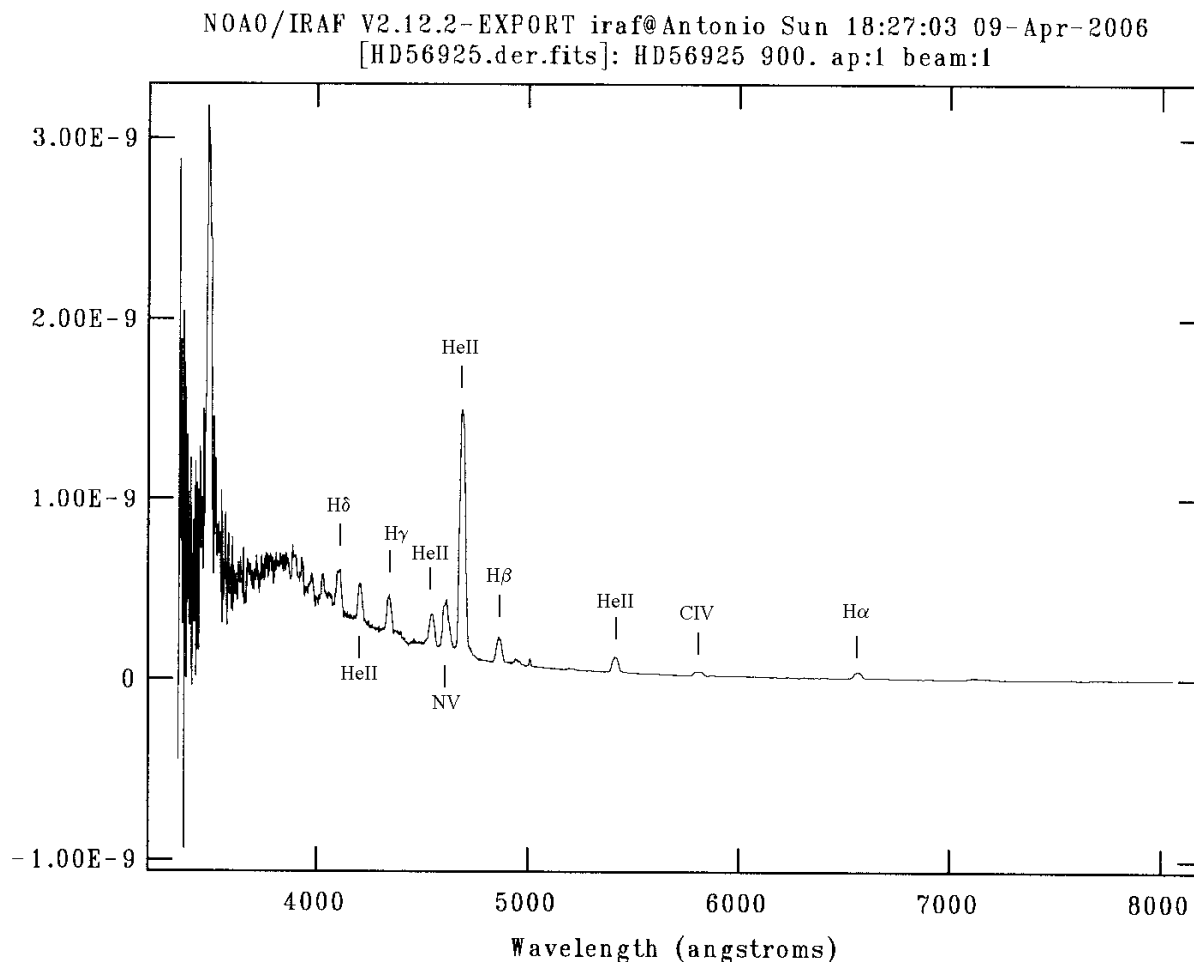


Figura 8. L'identificazione delle principali righe di HD56925.

Si possono notare un gran numero di righe dell'HeII, tipiche delle Wolf-Rayet, quasi sempre in emissione, qualche riga dell'idrogeno e dell'elio neutro, di intensità molto minore, e un paio di righe dell'azoto ionizzato che permettono di identificare quest'oggetto come una WR di tipo N (WN), mentre nelle WC predominano le righe del carbonio.

Anche qui per gli stessi problemi citati prima abbiamo preferito una classificazione spettrale "ad occhio", sempre utilizzando gli spettri disponibili sul sito dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (figura 9):

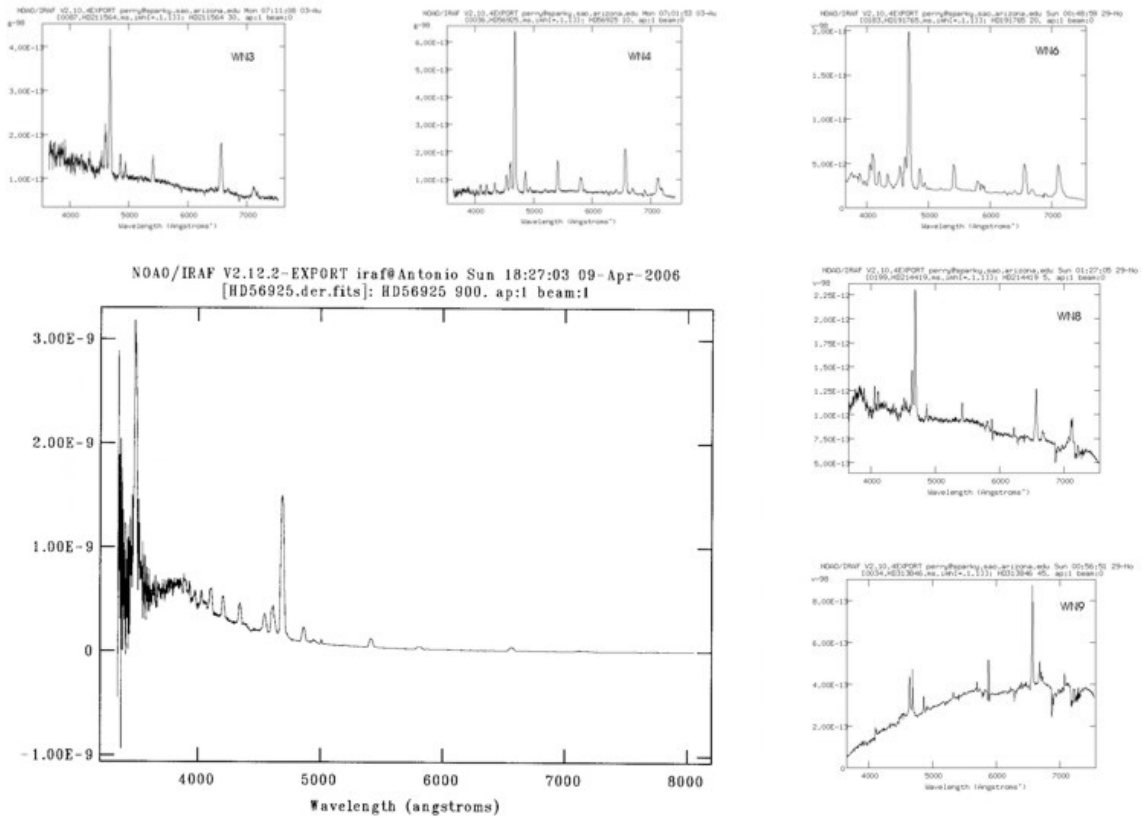


Figura 9. Lo spettro di HD56925 (in basso a sinistra) confrontato con spettri di stelle WN standard.

Qui si vede chiaramente che la notevole intensità delle righe dell'HeII e dell'azoto, rapportate alla modesta intensità delle righe della serie di Balmer e dell' HeI suggeriscono che il nostro oggetto sia una WN dei primi tipi spettrali; in letteratura viene classificata come una WN4, con qualche incertezza (WN5, secondo altri).

Infine, anche in questo caso abbiamo tentato di stimare la temperatura dell'oggetto, facendo un'interpolazione con la curva di corpo nero, ma poiché il massimo di questi oggetti è situato nel lontano ultravioletto non siamo riusciti a trovare un valore significativo della temperatura (figura 10):

NOAO/IRAF V2.12.2-EXPORT iraf@Antonio Sun 18:50:51 09-Apr-2006  
func=bbody, low\_rej=0, high\_rej=0, niterate=1, grow=0  
total=2048, sample=936, rejected=0, deleted=0, CHISQ=6.6E-21

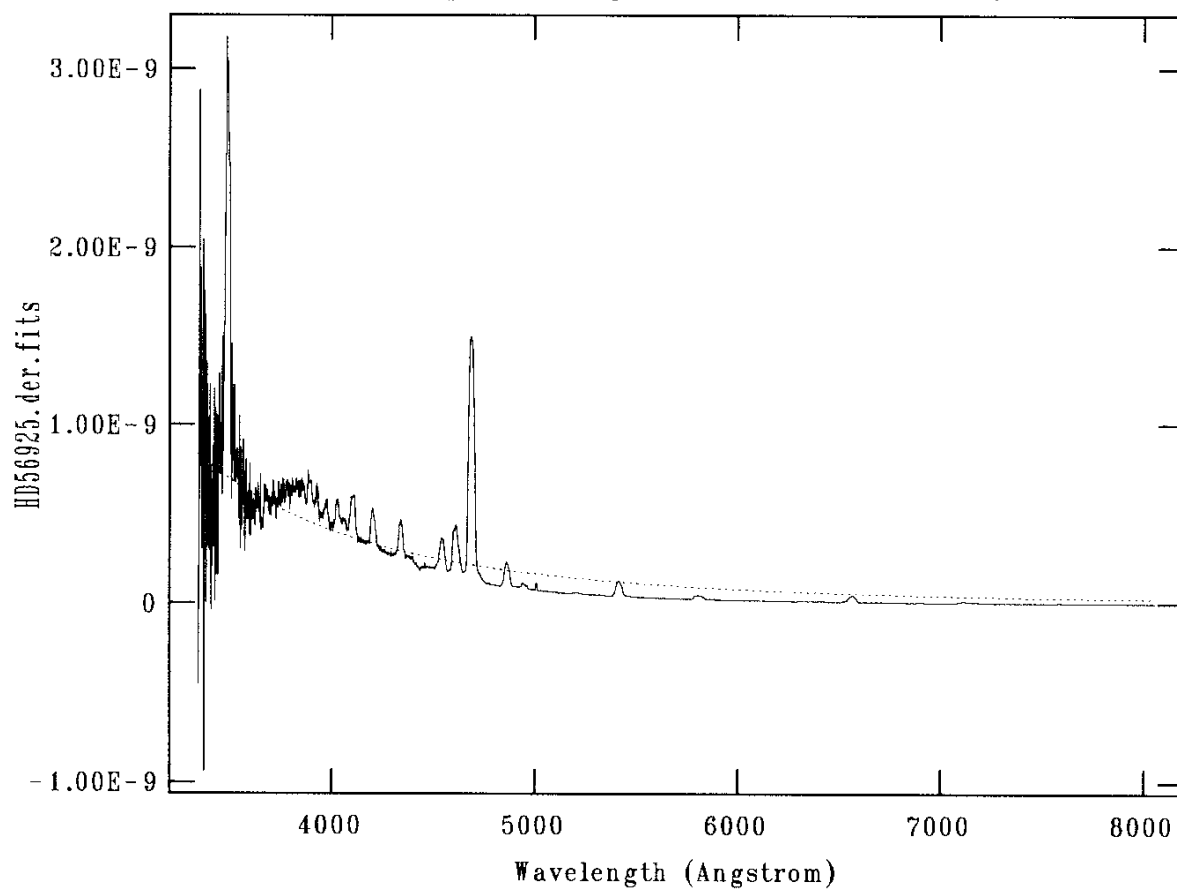


Figura 10. L'interpolazione dello spettro di HD6925 con una planckiana (curva tratteggiata).

Le temperature ottenute variando i parametri della planckiana non sono mai state inferiori alle centinaia di migliaia di gradi, certamente non molto attendibili ma sufficienti per affermare che si tratta delle stelle più calde mai osservate.